

Aufbau eines Hochtemperatur-Spinnermagnetometers zur magnetischen Untersuchung von Ozeanbasalten

Diplomarbeit

vorgelegt von
Michael Wack

Juni 2006

Department für Geo- und Umweltwissenschaften
Geophysik
Ludwig-Maximilians-Universität München

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
1. Einleitung	9
2. Messanordnung	12
2.1. Überblick	12
2.2. Mechanischer Aufbau	14
2.2.1. Helmholtz Spulen	16
2.2.2. Antrieb	18
2.2.3. Probenplattform	19
2.2.4. Sensorhalter	22
2.3. Heizung	23
2.3.1. Heißluftgebläse	24
2.3.2. Heizring	25
2.3.3. Absaugung	26
2.3.4. Kühleinheit	27
2.3.5. Heizkurven	29
2.4. Elektronik	31
2.4.1. Haupteinheit	32
2.4.2. Sensoren	34
2.4.3. Verstärker- und Filterschaltung	35
2.4.4. Mikroprozessoreinheit	38

2.4.5. Eurotherm-Regler	40
3. Mathematische Grundlagen	42
3.1. Verwendete Symbole	42
3.2. Magnetisches Außenfeld einer Probe	42
3.2.1. Koordinatensysteme	43
3.2.2. Probenmagnetisierung	45
3.2.3. Magnetisches Dipolfeld	46
3.3. Sensorgleichungen	47
3.4. Eigenschaften der Messsignale	48
4. Optimierung der Sensorgeometrie	51
4.1. Anforderungen	51
4.2. Amplitudenverlauf	53
4.3. Eigenschaften der endgültigen Geometrie	54
5. Analyse der Messdaten	58
5.1. Regressionsrechnung	58
5.2. Erweiterung der Regression zur Kompensation linearer Störungen	60
5.3. Fehler	61
6. Software	63
6.1. Software zur Datenaufzeichnung	63
6.1.1. Beschreibung der Funktionsweise	63
6.2. Software zur Datenanalyse	65
6.2.1. Beschreibung der Funktionsweise	65
6.3. Mikroprozessor Firmware	66
6.3.1. Entwicklungsumgebung	66
6.3.2. Beschreibung der Funktionsweise	67
7. Testmessungen und Fehlerabschätzungen	69
7.1. Hintergrundfeld	69
7.2. Einfluss elektrischer Verbraucher auf die Signalqualität	72

Inhaltsverzeichnis

7.3. Einfluss der Magnetisierung des Temperatursensors	72
7.4. Acht-Lagen-Messung einzelner Proben	76
7.4.1. Ablauf der Messungen	77
7.4.2. Magnetisierungsrichtungen	78
7.4.3. Kalibrierung	81
7.4.4. Fehler	82
7.4.5. Datenbeispiele	83
7.5. Empfindlichkeit	85
8. Messung von Ozeanbasalt-Proben	86
8.1. Hotspin-II-Messungen	86
8.2. VFTB-Messungen	94
9. Zusammenfassung	98
10. Danksagung	100
A. Firmenverzeichnis und Bezugsquellen	102
B. Matlab Routinen	105
C. Quelltext Mikroprozessor	110
D. LabView Diagramme	124
E. Schaltpläne	128
E.1. Signalverstärkung und Filterung	128
E.2. Hilfsspannungsversorgung	130
F. Verzeichnis der Datenblätter und Betriebsanleitungen	131
G. Literaturverzeichnis	133

Abbildungsverzeichnis

1.1. Magnetische Anomalien im Südatlantik.	10
1.2. Magnetisierungsintensität von Ozeanbodenbasalten.	11
2.1. Messaufbau im Überblick.	13
2.2. Das Messgerät während des Aufbaus ohne Isolierung.	15
2.3. Geometrie einer Helmholtzspule.	16
2.4. Antriebsmotor.	18
2.5. Probenplattform.	19
2.6. CAD-Modell der Probenplattform.	20
2.7. Standard-Inch Probe auf einem Quarzglas Probenhalter.	21
2.8. Bemaßte Skizze des Sensorhalters.	22
2.9. Sensorhalter.	23
2.10. Foto des verwendeten Heißluftgebläses.	24
2.11. CAD-Modell des Heizrings.	25
2.12. Eine Inch-Probe in einem zur Bestückung geöffneten Segment des Heizrings.	26
2.13. In der Werkstatt hergestellte Luftabsaugung.	27
2.14. Kühleinheit.	28
2.15. Heizkurven.	30
2.16. Haupteinheit der Elektronik.	31
2.17. Logische Verbindungen der Elektronikkomponenten.	33
2.18. Fluxgate-Sensor-Tripel mit der zugehörigen Elektronik.	34
2.19. Fertig aufgebaute Signalverstärker und -filter.	35
2.20. Frequenzverhalten des eingesetzten Tiefpassfilters.	37

Abbildungsverzeichnis

2.21. Platine des Mikroprozessors.	39
3.1. Definition der Kernkoordinaten einer Probe.	43
3.2. Definition des gewählten Gerätekoordinatensystems.	44
3.3. Komponenten der Sensorsignale.	50
4.1. Mindestabstand der Sensoren von der Probe.	52
4.2. Geometrischer Offset der Sensoren.	53
4.3. Anordnung der sechs Fluxgate-Sensoren.	56
4.4. Graphische Darstellung der Amplituden der I_{ij}	57
6.1. Abtastung und Mittelwertbildung der Sensorsignale.	68
7.1. Absolutwerte des Restfelds.	71
7.2. Messsignale ohne Probe über einen Winkelbereich von 360°	73
7.3. Messsignale mit und ohne einer Probe.	75
7.4. Ausrichtung der Proben in acht Lagen für $\phi = 0$	77
7.5. Gemessene Magnetisierungsrichtungen in 8 Lagen.	79
7.6. Magnetisierungsrichtungen aus den 8-Lagen-Messungen.	80
7.7. Eichmessung.	81
7.8. Fehlerkorrelation von 5 Proben in 8 Lagen.	82
7.9. Datenbeispiele.	84
8.1. Hotspin-II-Ergebnisse von Probe 427-9-2.	89
8.2. Hotspin-II-Ergebnisse von Probe 427-9-3.	90
8.3. Hotspin-II-Ergebnisse von Probe 428A-4-2.	91
8.4. Hotspin-II Ergebnisse von Probe 427-9-2.	92
8.5. Hotspin-II-Ergebnisse von Probe 427-9-3.	93
8.6. VFTB-Ergebnisse von Probe 427-9-2.	95
8.7. VFTB-Ergebnisse von Probe 427-9-3.	96
8.8. VFTB-Ergebnisse von Probe 428A-4-2.	97
D.1. ADC_Read_Sample.vi	124
D.2. Sij.vi	125

Abbildungsverzeichnis

D.3. Fit_M.vi	126
D.4. xyz2IDF.vi	127
E.1. Schaltplan der Filter- und Verstärkerelektronik.	128
E.2. Leiterplattenlayout der Filter- und Verstärkerelektronik	129
E.3. Schaltplan der Hilfsspannungsversorgung.	130

Tabellenverzeichnis

2.1. Technische Daten des verwendeten Heißluftgebläses.	24
3.1. Verwendete Symbole.	42
4.1. Gewählte Anordnung der Sensoren.	54
7.1. Proben, die für die Testmessungen in acht Lagen benutzt wurden. . . .	76
7.2. Gemittelte Ergebnisse aus den Hotspin-Messungen in 8 Lagen.	78
7.3. Vergleich der Ergebnisse einer schwachen Probe.	85
8.1. Ergebnisse der Untersuchungen mit der VFTB.	94
F.1. Verzeichnis der verwendeten Datenblätter	132
F.2. Verzeichnis der verwendeten Betriebsanleitungen	132

1. Einleitung

Bei paläo- und gesteinsmagnetischen Untersuchungen können zwei verschiedene Techniken zur thermischen Entmagnetisierung eingesetzt werden. Der Unterschied liegt in der Temperatur, bei welcher die Magnetisierung gemessen wird. Bei der schrittweisen Methode (z.B. Irving et al., 1961; Stephenson, 1967) wird die Probe bis zu einer bestimmten Temperatur erhitzt, dann abgekühlt und bei Raumtemperatur gemessen. Dieser Vorgang muss für sämtliche Temperaturschritte wiederholt werden. Der Vorteil ist, dass viele Proben gleichzeitig und unter gleichen Bedingungen erhitzt werden können. Das zweite, kontinuierliche Verfahren (z.B. Creer, 1967) basiert auf der Messung der Magnetisierung während des Aufheizens bzw. Abkühlens. Dadurch ist nur eine Erhitzung erforderlich und es können Effekte wie die Selbstumkehr der Remanenz oder Veränderungen des magnetischen Verhaltens durch thermische Alteration untersucht werden. Die Ergebnisse der beiden Verfahren können systematische Abweichungen sowohl in der Intensität als auch in den für die Paläomagnetik besonders wichtigen Richtungen der Magnetisierung (Schmidt und Clark, 1985) zeigen.

In der Abteilung Geophysik des Departments für Geo- und Umweltwissenschaften der Universität München stehen verschiedene Magnetometer zur Verfügung. Darunter kommerzielle Spinner- und Kryogenmagnetometer sowie eine VFTB (Variable Frequency Translation Balance). Alle diese Geräte erlauben jedoch nicht die kontinuierliche Beobachtung der natürlichen remanenten Magnetisierung (NRM) im Nullfeld bei höheren Temperaturen.

Ein erstes Gerät (*Hotspin I*) für diesen Zweck entstand 1990 im Rahmen einer Diplom-

1. Einleitung

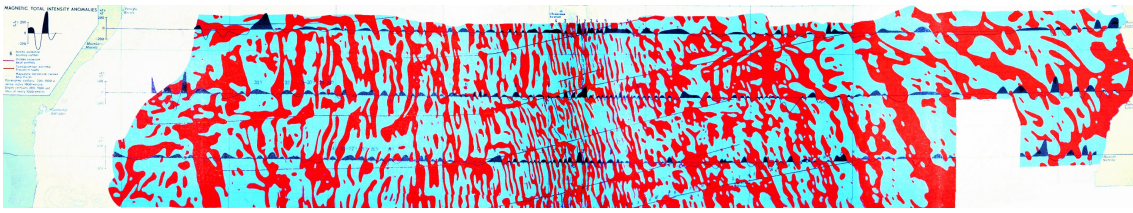


Abbildung 1.1.: Magnetische Anomalien im Südatlantik. Dargestellt ist der Bereich von 35°W 7°S bis 13°E 17°S (aus Udintsev (1989)).

arbeit durch den Umbau eines Spinner-Magnetometers der Firma Digico (Gerstle, 1990). Es wurde später weiterentwickelt und zur Untersuchung von Ozeanbasalten aus dem ODP (Ocean Drilling Program) eingesetzt (Matzka, 2001; Matzka et al., 2003). Die Bestimmung der remanenten Magnetisierung war bei *Hotspin I* auf zwei Komponenten pro Probe beschränkt. Die fehlende dritte Komponente konnte nur durch eine weitere Messung an einer Schwesterprobe bestimmt werden. Aufgrund möglicher kleinräumiger Inhomogenitäten im Gestein ist dieses Verfahren nicht nur zeitaufwändig, sondern auch mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies führte zur Konstruktion eines völlig neuen Hochtemperatur-Spinner-Magnetometers (*Hotspin II*) ohne die zuvor genannten Einschränkungen. Dessen Aufbau sowie die Eignung zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Ozeanbasalten soll in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden.

Abbildung 1.1 zeigt an einem Beispiel aus dem Südatlantik die magnetischen Anomalien der Ozeanböden. Diese entstehen durch das Sea-Floor-Spreading und die Aufzeichnung der Polaritätszeitskala in den Ozeanbasalten (Vine und Matthews, 1963) und stellen einen der letzten wichtigen Beweise für die Theorie der Plattentektonik von Wegener (1915) dar. Die magnetischen, mineralogischen und physikalischen Eigenschaften der Ozeanbasalte wurden insbesondere im Rahmen des DSDP (Deep Sea Drilling Project), ODP (Ocean Drilling Program) und IODP (Integrated Ocean Drilling Project) immer genauer untersucht. Bemerkenswert ist das in Abbildung 1.2 gezeigte globale Minimum der Magnetisierungsintensität bei einem Alter um 20 Ma

1. Einleitung

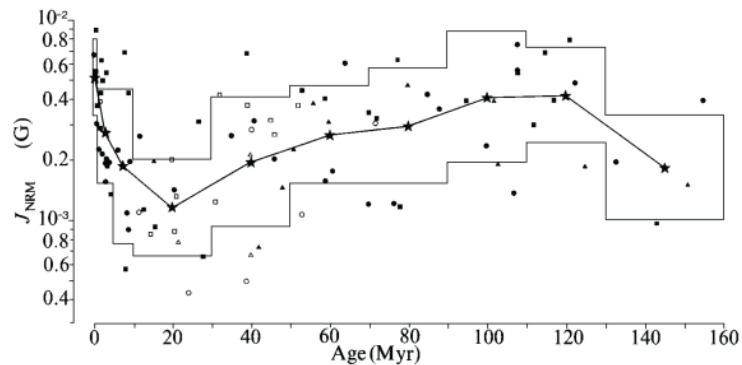


Abbildung 1.2.: Magnetisierungsintensität von Ozeanbodenbasalten. Aufgetragen ist die NRM über dem Alter. Besonders auffällig ist das Minimum bei 20 Ma (Bleil und Petersen, 1983).

(Bleil und Petersen, 1983). Die Ursachen sind bis heute unklar. Als Möglichkeiten wurden Änderungen im Paläomagnetfeld der Erde (Wang et al., 2005) sowie mineralogische Änderungen (Bleil und Petersen, 1983) vorgeschlagen. Auch die chemische Zusammensetzung (Gee und Kent, 1997) und die Korngrößen bei der Entstehung beeinflussen die Magnetisierung, jedoch sind hier globale Änderungen unwahrscheinlich.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Messgerät soll benutzt werden, um aus den Entblockungstemperaturen die Träger der NRM zu bestimmen. Es wird angenommen, dass weder die Curie-Temperaturen aus Starkfeld-Messungen noch die Entblockungstemperaturen aus schrittweisen thermischen Entmagnetisierungen geeignet sind, um die Träger der natürlichen remanenten Magnetisierung dieser Gesteine zu charakterisieren. Dies liegt unter anderem daran, dass die bei Ozeanbasalten typischen Magnetminerale beim Heizen alteriert werden. Existiert eine Abhängigkeit der Entblockungstemperatur oder auch anderer Eigenschaften der kontinuierlichen thermischen Entmagnetisierung vom Probenalter, so wäre dies ein Hinweis auf eine globale, charakteristische Alteration der Magnetminerale und könnte den in Abbildung 1.2 gezeigten Intensitätsverlauf der Magnetisierung erklären.

2. Messanordnung

2.1. Überblick

Bei dem in dieser Diplomarbeit beschriebenen Magnetometer handelt es sich um ein Off-Axis-Spinner-Magnetometer mit integrierter Probenheizung. „Off-Axis“ bedeutet hier, dass sich die zu messenden Proben nicht um eine ihrer Hauptachsen wie beim klassischen Spinner-Magnetometer, sondern um eine Achse deutlich außerhalb der Probe drehen und sich somit auf einer Kreisbahn bewegen. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, mehrere Proben gleichzeitig zu messen und alle drei Komponenten der Magnetisierung zu bestimmen, ohne die Probe in unterschiedlichen Orientierungen einlegen zu müssen. Dies ist insbesondere bei den angestrebten kontinuierlichen Hochtemperaturmessungen interessant, da die Orientierung sonst während des Heizens geändert werden müsste. Diesen Vorteilen steht jedoch ein deutlich größerer und mechanisch aufwändigerer Messaufbau sowie eine komplexere Auswertung der Messdaten gegenüber.

Als Sensoren werden Fluxgate-Sonden eingesetzt, die das Streufeld der sich bewegenden Gesteinsproben kontinuierlich erfassen. Durch die Messung von Feldgradienten wird eine Beeinflussung der Messsignale durch ein Hintergrundfeld vermieden. Die Messung soll dennoch in einem möglichst geringen magnetischen Hintergrundfeld geschehen, um induzierte Magnetisierungen und den Erwerb von Thermoremanenzen beim Kühlen der Proben auszuschließen. Um dies zu gewährleisten, befindet sich das gesamte Gerät innerhalb eines Käfigs aus drei Helmholtz-Spulen, mit denen sich das Erdmagnetfeld kompensieren lässt (siehe

2. Messanordnung

Abschnitt 2.2.1). Zusätzlich bietet dieser Aufbau die Möglichkeit, die Kompensation parallel zur Drehachse aufzuheben und so gezielt partielle thermoremanente Magnetisierungen (pTRM) zu erzeugen und das Gerät beispielsweise für automatisierte Paläointensitätsmessungen nach der Methode von Thellier und Thellier (1959) einzusetzen.

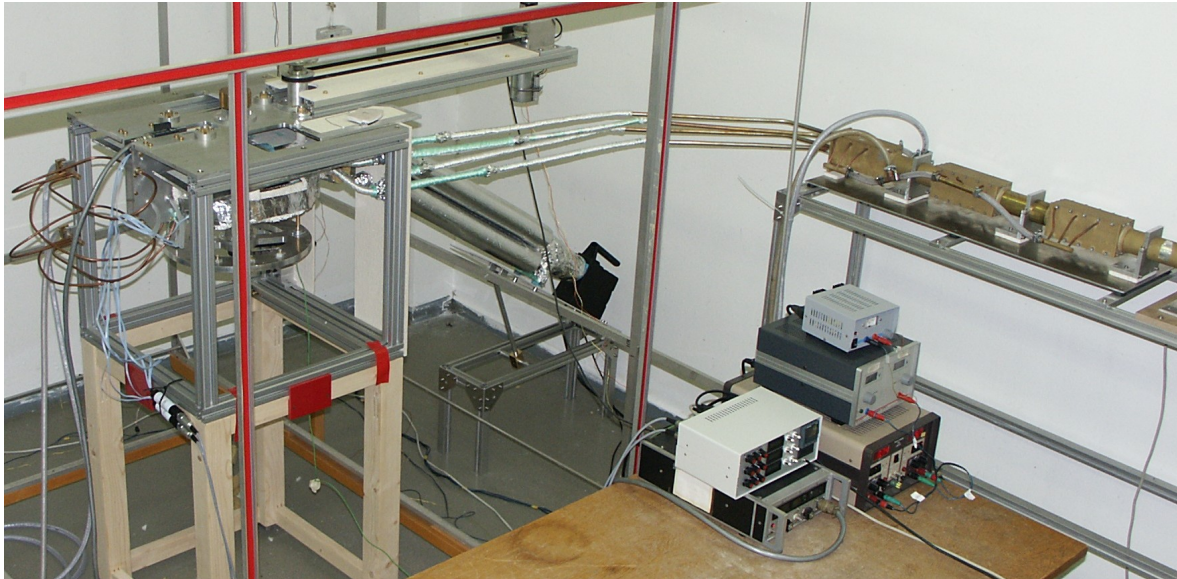


Abbildung 2.1.: Messaufbau im Überblick.

Links: das eigentliche Messgerät innerhalb der Helmholtzspulen. In der Mitte hinten: das Heißluftgebläse. Auf dem Tisch: die Stromversorgungen, Instrumentenelektronik. Ganz rechts: Kühleinheit für die Abluft, um die Absaugung vor Überhitzung zu schützen.

Um magnetische Störfelder weiter zu minimieren, befinden sich außer den Sensoren alle elektrischen Komponenten wie Motoren, Heizdrähte sowie Regel- und Verstärkerschaltungen möglichst weit von den Proben und Sensoren entfernt.

Diese Anforderungen führten beim Design des ringförmigen Ofens (im Folgenden auch Heizring genannt), in dem die Proben umlaufen, zu einem recht außergewöhnlichen Konzept. Die Wärme wird in Form heißer Luft aus einem elektrischen Heiß-

luftgebläse durch Kupferrohre zum eigentlichen Ofen transportiert (siehe Abschnitt 2.3). Dies stellte sich in Kombination mit dem vergleichsweise großen zu heizenden Volumen als eines der größten Probleme beim Aufbau des Gerätes heraus und erforderte zusätzlich die Konstruktion einer Absaugung mit vorgeschaltetem Kühler, um den Wärmetransport in den Heizring zu verbessern. Trotz dieser Maßnahmen sind im Moment nur Messungen bis 330°C möglich. Diese Maximaltemperatur stellt zumindest sicher, dass etwaige viskose Überprägungen bei niedrigeren Temperaturen isoliert werden können. Sollte keine Lösung zur Steigerung der Maximaltemperatur gefunden werden, können Messungen bis zu 600 °C mit dem *Hotspin I* Gerät (Matzka, 2001) durchgeführt werden, wobei dann nur die Magnetisierung innerhalb einer Ebene gemessen werden kann.

Die eigentliche Messung erfolgt durch sechs Fluxgate-Sensoren, die den Gradienten des magnetischen Streufelds der Proben messen. Da sich die Proben, wie oben beschrieben, auf einer Kreisbahn an den Sensoren vorbei bewegen, ähneln die Messdaten solchen, die aus der Vermessung von magnetischen Anomalien im Gelände bekannt sind. Bei einem konventionellen Spinnermagnetometer hingegen wäre das Messsignal eine Sinuskurve der Rotationsfrequenz.

Mit einer speziell für das Messgerät mit LabView entwickelten Software erfolgt sowohl die automatische Steuerung der Temperatur sowie die Aufzeichnung der Messdaten (siehe Abschnitt 6.1), die durch eine dafür entwickelte elektronische Schaltung verstärkt und gefiltert werden (siehe Abschnitt 2.4.3). Zur Auswertung und Analyse der Daten wurde eine weitere Software mit Labview entwickelt (siehe Abschnitt 6.2). Die Einzelkomponenten des Instruments werden in den nächsten Abschnitten ausführlich behandelt.

2.2. Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau wurde von den Mitarbeitern der Werkstätten des Department für Geo- und Umweltwissenschaften der LMU München realisiert. Beim Auf-

2. Messanordnung

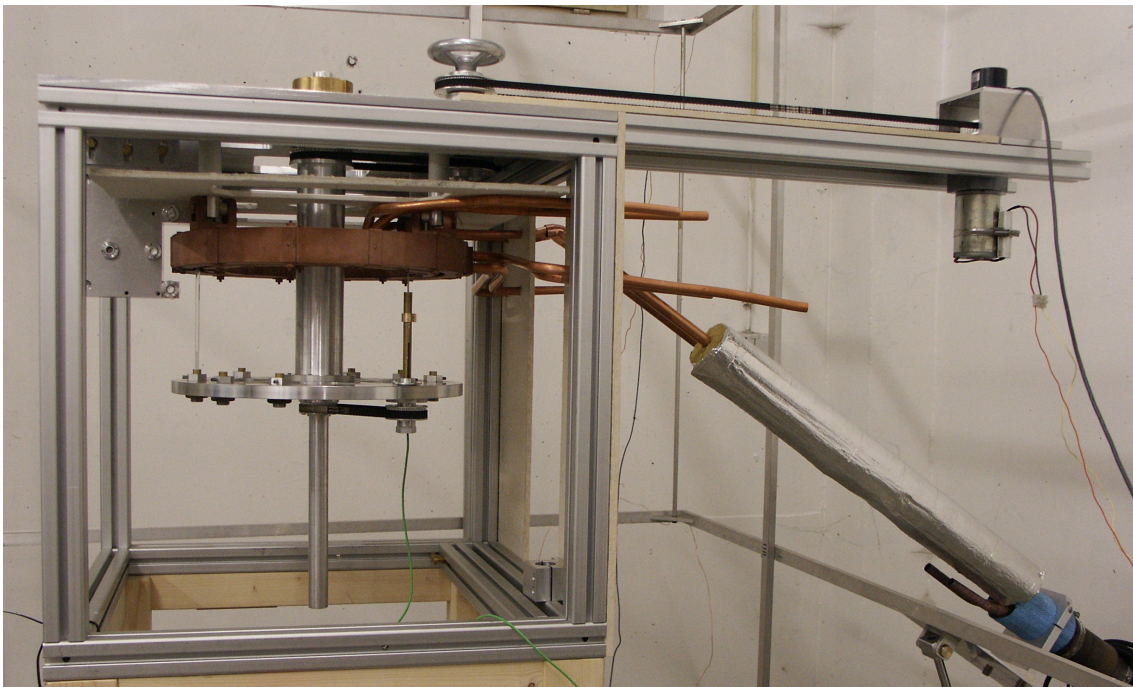


Abbildung 2.2.: Das Messgerät während des Aufbaus ohne Isolierung. Man erkennt links oben den Sensorhalter, rechts oben den Antrieb. In der Mitte findet sich der Heizring aus Kupfer und darunter die rotierende Probenplattform. Darauf sind das Thermoelement sowie ein Probenhalter montiert. Von rechts unten erfolgt die Zuführung der heißen Luft, die Absaugung ist noch nicht angeschlossen.

bau der gesamten Apparatur wurde darauf geachtet, keinerlei ferro- bzw. ferrimagnetische Substanzen im Umfeld der Proben und der Sensoren zu verwenden. Zum Einsatz kam daher Aluminium für die tragende Konstruktion sowie die meisten beweglichen Teile, Keramik zur thermischen Trennung von Bauteilen wie z.B. bei der Aufhängung des Ofens, Kupfer für den Ofen selbst und die Rohrleitungen, temperaturbeständige Lager aus Kunststoff, Probenhalter aus Quarzglas, Isoliermaterial aus Teflon, Glasfilamenten (Isotherm 1000, 800 der Firma Frenzelit) sowie mineralische Bestandteilen.

2.2.1. Helmholtz Spulen

Zur Kompensation des Erdmagnetfeldes und anderer zeitlich konstanter und hinreichend homogener Hintergrundfelder befindet sich der gesamte Messaufbau in einem Käfig aus drei senkrecht zueinander stehenden quadratischen Helmholtz Spulen mit einer Kantenlänge von $2a = 2$ m. Der Abstand der jeweils zusammengehörenden Einzelspulen beträgt $1,088a$. Dadurch erreicht man eine optimale Homogenität des Feldes in der Mitte (Collinson, 1983).

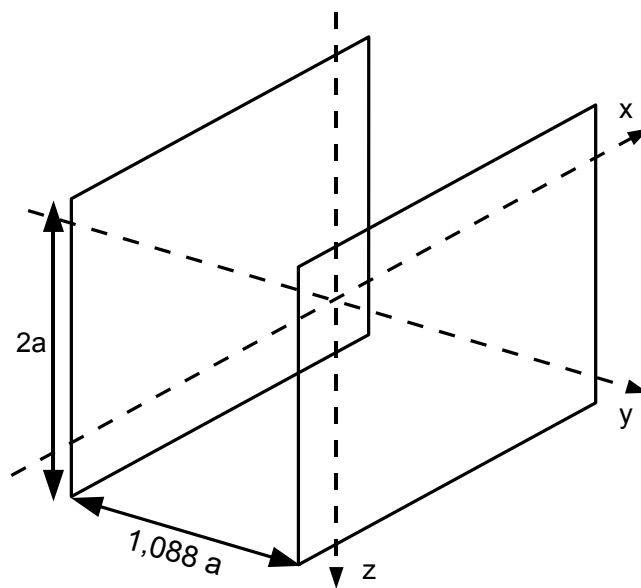


Abbildung 2.3.: Geometrie einer Helmholtzspule.

Die gezeigte Anordnung dient der Kompensation eines Feldes in y -Richtung. Es kommen drei dieser Spulen in orthogonaler Anordnung zum Einsatz.

Durch Einstellen eines geeigneten elektrischen Stromflusses durch jedes Spulenpaar lässt sich im zentralen Bereich ein homogenes magnetisches Gegenfeld in der jeweiligen Raumrichtung erzeugen und damit die externe Feldkomponente kompensieren.

Feldhomogenität

Die Inhomogenität des Feldes ist entlang der y-Achse am größten (siehe 2.3). Deshalb ist die Feldabweichung innerhalb eines kugelförmigen Volumens mit Radius y nirgends größer als der folgende Ausdruck für die Inhomogenität der y-Komponente des Feldes (Collinson, 1983).

$$\frac{B_0 - B_y}{B_0} = \frac{1}{a^4} (0.783y^4 - 1.668y^2 (x^2 + z^2) - 1.95x^2z^2 + 0.458 (x^4 + z^4)) \quad (2.1)$$

Damit ergibt sich innerhalb des Volumens, das von Ofen sowie den Sensoren eingenommen wird (Radius 0,25 m), laut Gleichung 2.1 eine Inhomogenität von

$$\frac{B_0 - B_y}{B_0} = \frac{1}{1 \text{ m}^4} \cdot 0,783 \cdot (0,25 \text{ m})^4 = 0,003 \quad (2.2)$$

Bei einem maximal zu kompensierenden Erdmagnetfeld von ca. $43 \mu\text{T}$ in z-Richtung entspricht dies einer maximalen Inhomogenität von 132 nT innerhalb der Probenumgebung. Dies ist deutlich weniger als die zeitliche Variation des externen Magnetfeldes (siehe 7.1) und ist somit am aktuellen Aufstellungsort kein limitierender Faktor. In einer magnetisch ruhigeren Umgebung, wie dem geplanten zukünftigen Standort im magnetischen Laboratorium in Niederlippach, wird sicherlich eine verbesserte Feldhomogenität sinnvoll sein.

Allgemein ist zu bemerken, dass sowohl Feldschwankungen (sofern sie räumlich gleichmäßig erfolgen) sowie zeitlich und räumlich konstante Gradienten, wie sie beispielsweise von den Helmholtzspulen herrühren, die eigentliche Messung nicht beeinflussen, da sich dies nur in einer Offsetänderung der Sensoren auswirkt, welche sowohl durch Einstellung der Verstärkerelektronik sowie rechnerisch bei der Auswertung entfernt werden kann.

Die Restfelder sollten trotzdem möglichst klein gehalten werden, um eine Beeinflussung der Messung durch induzierte Magnetisierungen und insbesondere den Erwerb von pTRMs (partielle Thermoremanenzen) durch die Proben beim Abkühlen zu ver-

meiden. Nach Collinson (1983) wären bei der thermischen Entmagnetisierung Restfelder < 1 nT wünschenswert.

Durch die Rotation der Proben in der x-y-Ebene symmetrisch zu den Helmholtzspulen mitteln sich die x- und y-Komponenten des externen Feldes während einer Umdrehung heraus. Ein Remanenzverlust der Proben ist deshalb nur in z-Richtung zu befürchten. Da sich die Proben nicht in z-Richtung bewegen, muss das Feld in dieser Richtung nur in einem kleinen Bereich entsprechend der Probenhöhe kompensiert werden, was kleinere Feldgradienten laut Gleichung 2.1 ermöglicht.

Ein noch homogeneres Hintergrundfeld wäre nur zu realisieren, wenn das gesamte Magnetometer inkl. der Helmholtzspulen in einem Raum mit reduziertem Hintergrundfeld betrieben würde, da ansonsten die Spulensysteme aufgrund des großen Messvolumens und der geforderten Homogenität des Feldes unrealisierbar groß ausfallen müssten.

2.2.2. Antrieb

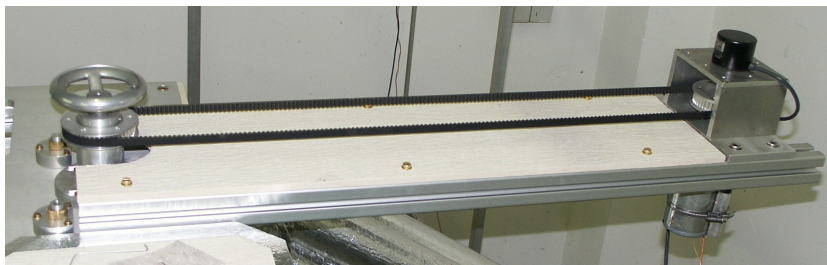


Abbildung 2.4.: Antriebsmotor.
Mit Drehgeber und Zahnriemen zur Kraftübertragung.

Motor

Der Antrieb erfolgt über einen Gleichstrommotor, der an einem Ausleger am Hauptrahmen des Messgerätes befestigt ist. Die Drehzahl lässt sich manuell mit einem La-

bornetzteil einstellen. Bei einer Spannung von 3V erreicht der Motor 7 Umdrehungen pro Minute (upm). Die Kraft wird mittels zweier Zahnriemen spielfrei auf die zentrale Achse und damit die Probenplattform übertragen (Bild 2.4 und 2.2).

Drehgeber

Über dem Motor und direkt mit dessen Achse verbunden ist ein Drehgeber vom Typ E6C3 der Firma Omron (siehe Firmenverzeichnis in Anhang A) installiert. Dieser liefert auf einer Signalleitung 500 Impulse pro Umdrehung und auf einer weiteren einen Impuls bei einem mechanisch vorgegebenen Nulldurchgang. Durch die Verwendung gleich großer Zahnräder entspricht eine Umdrehung des Motors bzw. des Encoders genau einer Umdrehung der Proben. Damit ist es möglich, jederzeit den absoluten Drehwinkel exakt zu bestimmen. Aufgrund des starken magnetischen Störfeldes des Encoders konnte dieser nicht direkt auf der Antriebsachse der Probenplattform montiert werden.

2.2.3. Probenplattform

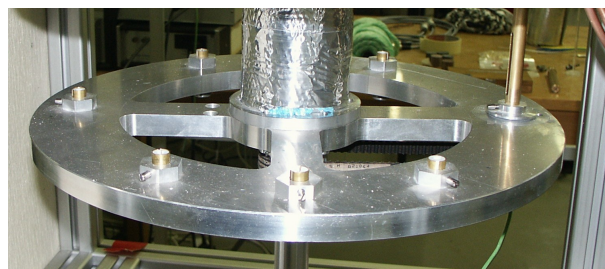


Abbildung 2.5.: Probenplattform.
Sie dient zur Aufnahme der Probenhalter und des Temperatursensors und sorgt für die angestrebte Bewegung der Proben auf einer Kreisbahn.

2. Messanordnung

Als Probenplattform (Foto: Abbildung 2.5, CAD-Entwurf: Abbildung 2.6) wird im Weiteren die zentrale große Scheibe aus Aluminium bezeichnet, die für die angestrebte Bewegung der Proben und des Temperatursensors auf einer Kreisbahn innerhalb des ringförmigen Ofens (siehe Kapitel 2.3.2) sorgt. Die Probenplattform besitzt acht Klemmhalterungen für die im nächsten Abschnitt beschriebenen Probenhalter.

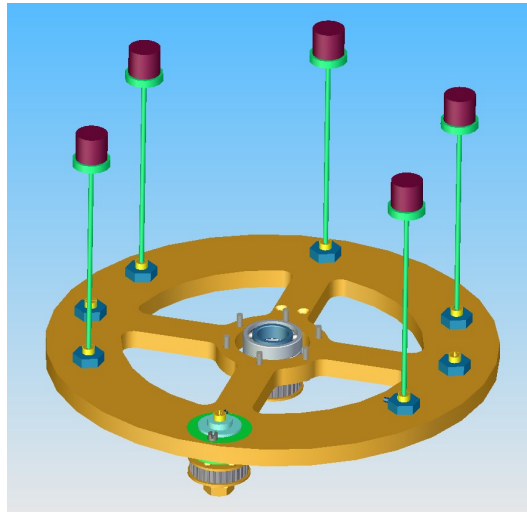


Abbildung 2.6.: CAD-Modell der Probenplattform.

Mit fünf Probenhaltern und Proben bestückt. Im Vordergrund ist die Halterung für den Temperatursensor dargestellt.

Die Klemmhalterungen sind so angeordnet, dass der Temperatursensor und jeweils eine, zwei, drei oder fünf Proben äquidistant montiert werden können. Damit ist immer der größte mögliche Abstand zwischen zwei Proben bzw. einer Probe und dem Temperatursensor sichergestellt und somit die optimale Trennung der magnetischen Signale.

Die Praxis zeigt jedoch, dass der verwendete Temperatursensor stark magnetisch ist (siehe auch Abschnitt 7.3). Deshalb wurden alle Messungen mit nur einer zum Temperatursensor diametralen Probe durchgeführt. Eine der Halterungen ist mit einem Zahnriemen so mit der nicht rotierenden Mittelsäule gekoppelt, dass die Rotation der Probenplattform kompensiert wird. Diese Halterung führt somit keine gebun-

dene Rotation wie die anderen aus und wird zur Aufnahme des Temperatursensors genutzt, um eine Verdrillung des Anschlusskabels zu vermeiden (Details siehe Abschnitt 2.4.5).

Probenhalter

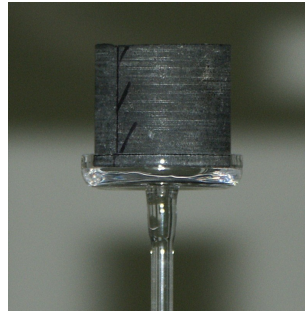


Abbildung 2.7.: Standard-Inch Probe auf einem Quarzglas Probenhalter.

Die verwendeten Probenhalter wurden von der Greiner und Gassner GmbH (siehe Firmenverzeichnis im Anhang A) angefertigt und bestehen aus einem Quarzglasstab von 15 cm Länge. Daran ist eine ebenfalls aus Quarzglas gefertigte Scheibe mit erhöhtem Rand befestigt. Auf diese kann eine Standard-Inch-Probe gestellt werden. Quarzglas wurde aufgrund seines geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, hohen Temperaturfestigkeit und seinen unmagnetischen Eigenschaften gewählt. Die Probenhalter lassen sich an verschiedenen Positionen in die dafür vorgesehenen Klemmhalterungen in der rotierenden Probenplattform einstecken. Das obere Ende des Glasstabs, und damit auch die Probe, ragt dann durch einen Schlitz im Boden des Ofen in diesen hinein.

2.2.4. Sensorhalter

Die Anordnung der Sensoren wurde durch Vorwärtsmodellierung der zu erwartenden Messsignale optimiert. Eine detailliertere Beschreibung des Verfahrens findet sich in Kapitel 4.

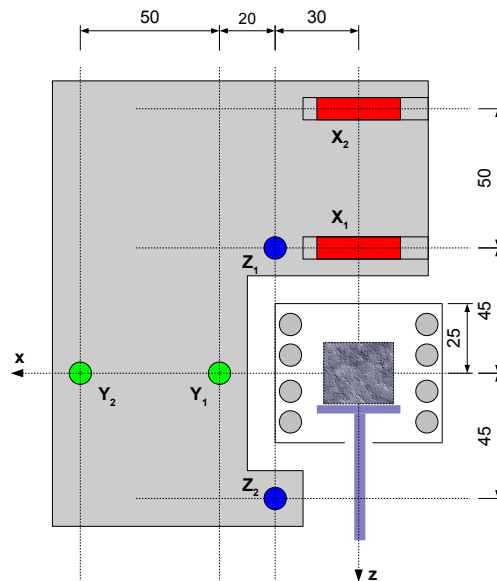


Abbildung 2.8.: Bemaßte Skizze des Sensorhalters.

Dargestellt sind auch eine Probe und deren Halter sowie acht Heißluft-Rohre im Querschnitt.

Die in Abbildung 2.8 dargestellte Sensorgeometrie wurde zur Herstellung eines Aluminium-Sensorhalters benutzt. Dieser wurde mit einer Wasserkühlung versehen, um eine konstante Temperatur und somit eine minimale Drift des Signals der Fluxgate-Sensoren zu gewährleisten. Die Abbildungen 2.9 zeigen den fertigen Sensorhalter sowie das zugrundeliegende CAD-Modell, aus dem der interne Aufbau ersichtlich wird.

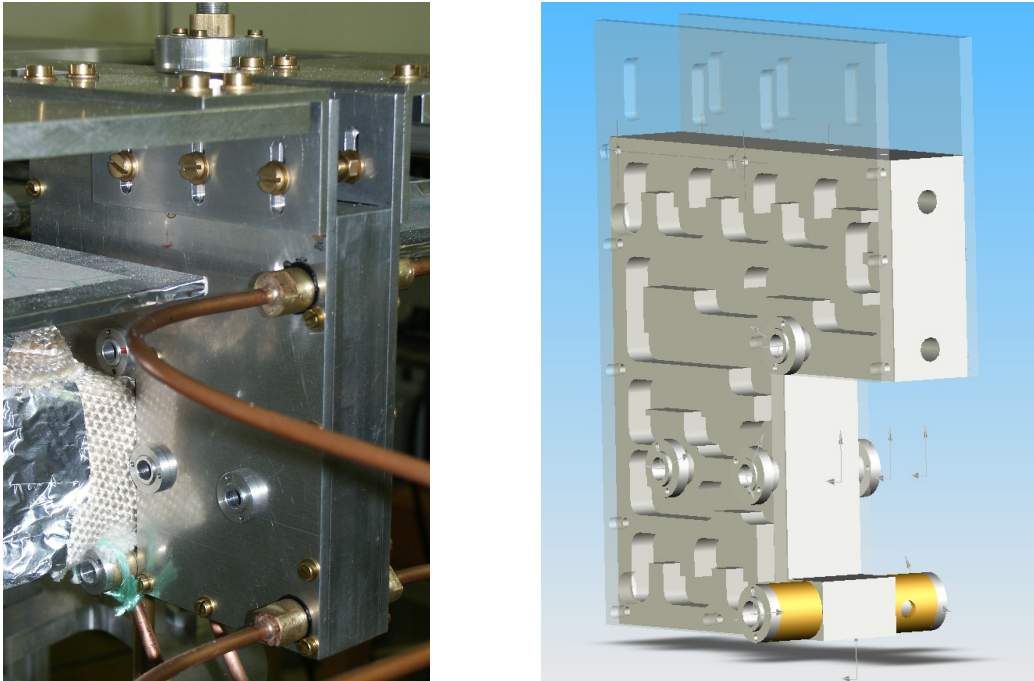


Abbildung 2.9.: Sensorhalter.

Links: mit angeschlossener Wasserkühlung, jedoch ohne Sensoren. Rechts: 180° gedreht, CAD-Modell. Um die gefrästen Kanäle zur Führung des Kühlwassers sichtbar zu machen, sind die beiden Abdeckplatten transparent dargestellt.

Es besteht für die Zukunft die Möglichkeit, eine Kupferspule am Sensorhalter anzubringen, um mit Hilfe eines genau bekannten Eichstroms die Fluxgatesensoren zu kalibrieren. Dies könnte auch während der Messung geschehen, wenn man die Zeiten nutzt, in denen sich keine Probe in der Nähe der Sensoren befindet.

2.3. Heizung

Das kontinuierliche Heizen und Abkühlen der Proben während der Messung ist eine der wichtigsten Eigenschaften des hier vorgestellten Magnetometers. Deshalb kam

dem Heizkonzept und seiner Umsetzung besondere Aufmerksamkeit zu.

2.3.1. Heißluftgebläse

Als Energiequelle dient ein Heißluftgebläse vom Typ „HotWind S“ der Firma Leister (siehe Firmenverzeichnis in Anhang A). Die technischen Daten finden sich in Tabelle 2.1. Ein Foto ist in Abbildung 2.10 zu sehen.



Abbildung 2.10.: Foto des verwendeten Heißluftgebläses.

Betriebsspannung	230 V
Elektrische Leistungsaufnahme	3100 W
Lufttemperatur	800 °C
Luftmenge bei 20 °C	350 l/min

Tabelle 2.1.: Technische Daten des verwendeten Heißluftgebläses.

Die heiße Luft wird über einen entsprechend angefertigten Adapter auf vier Kupferrohre mit einem Durchmesser von 18 mm verteilt und durch diese dem Heizring

zugeführt.

2.3.2. Heizring

Der Ofen ist eine Eigenkonstruktion in Form eines Rings. Auf der Innen- und Außenseite befinden sich jeweils vier gebogene Kupferrohre übereinander, durch die die heiße Luft geleitet wird. Die Aufheizung der Proben zwischen den Rohren der Innen- und Außenseite erfolgt durch Strahlungswärme, da die luftführenden Roh-

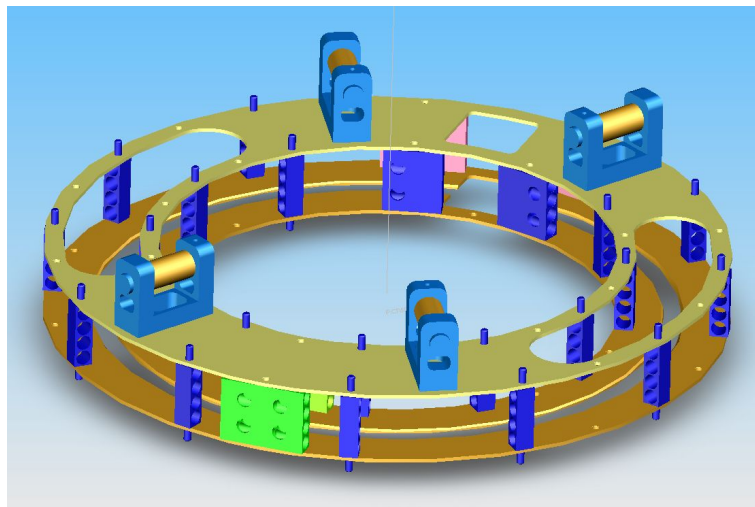


Abbildung 2.11.: CAD-Modell des Heizrings.

Heißluftführende Kupferrohre werden auf der Innen- und Aussenseite an den blau dargestellten Verbindungen von Ober- und Unterseite eingesetzt. Die Zu- und Abführung der Luft erfolgt an der grün markierten Anschlussstelle.

re vom Heißluftgebläse bis zur Absaugung geschlossen sind. Die Rohre wurden in Schleifen verlegt, die eine möglichst homogene Temperaturverteilung im Ofen ermöglichen sollen. In der Mitte der Unterseite befindet sich ein umlaufender Schlitz, durch den die Probenhalter (siehe Abschnitt 2.2.3) ins Innere des Heizrings ragen (Abbildung 2.11). In Bild 2.12 ist eine Probe innerhalb des Ofens zu sehen. Im Betrieb ist die Abdeckung geschlossen und isoliert.

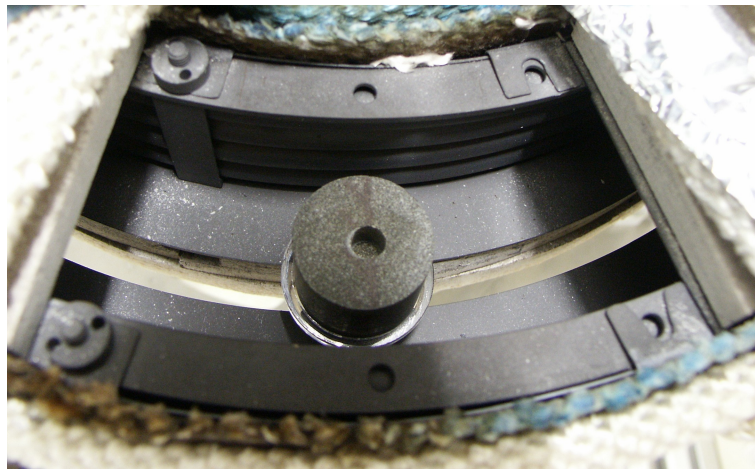


Abbildung 2.12.: Eine Inch-Probe in einem zur Bestückung geöffneten Segment des Heizrings.

2.3.3. Absaugung

Erste Tests zeigten schnell, dass die ursprünglich vorgesehene Lösung, Luft mit dem Heißluftgebläse durch den Heizring zu blasen, wenig effektiv war. Direkt am Heißluftgebläse trat ein Hitzestau auf und der Heizring erwärmte sich kaum. Um die Wärme schneller und effektiver in den Heizring zu transportieren, wurden zahlreiche Tests mit verschiedenen Apparaturen zur Absaugung der Abluft am Auslass des Heizrings durchgeführt. Die besten Ergebnisse (330 °C in 1,5 h; siehe Kurve 6 in Abbildung 2.15) wurden mit einer von der Werkstatt des Department für Geo- und Umweltwissenschaften angefertigten Kombination eines Waschmaschinenmotors mit einer Saugturbine eines Staubsaugers erzielt. Aufgrund der immensen Geräuschemission der Eigenkonstruktion kam bei weiteren Messungen vermehrt ein handelsüblich Staubsauger zum Einsatz, der jedoch statt den 330 °C nur 280 °C in einer ähnlichen Zeit erreichte.

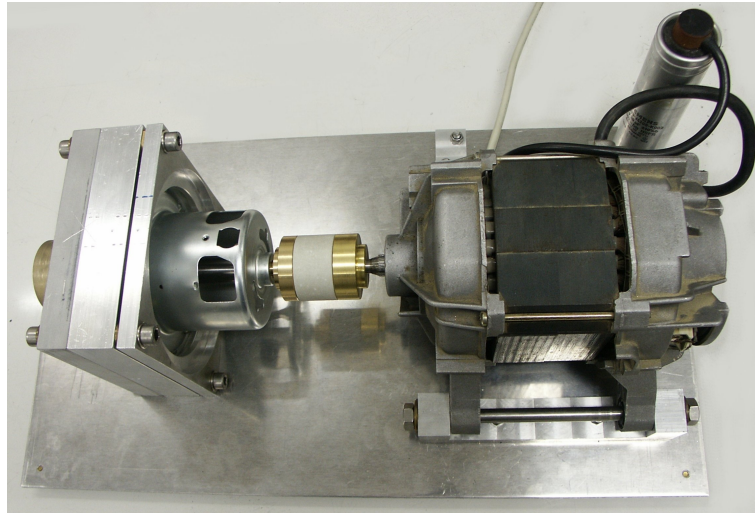


Abbildung 2.13.: In der Werkstatt hergestellte Luftabsaugung. Aus einem Waschmaschinenmotor mit 600W Leistung und einer Saugturbine eines Staubsaugers.

2.3.4. Kühleinheit

Es stellte sich als sehr schwierig heraus, eine Absaugung zu beziehen bzw. zu konstruieren, die langfristig für die erwarteten hohen Temperaturen von bis zu 600 °C geeignet ist. Deshalb wurde eine Kühleinheit entworfen, die die Abluft mittels wassergekühlter Rohre wieder auf Raumtemperatur kühlt und somit den Einsatz einfacherer Absaugungen und insbesondere normaler Staubsauger erlaubt. Als Nebeneffekt verbessert diese Abkühlung die Saugleistung erheblich, wie folgende Abschätzung zeigt.

Laut dem Gesetz von Gay-Lussac ist das Produkt aus Druck P und Volumen V eines idealen Gases proportional zur absoluten Temperatur T . Dies ist in guter Näherung für Luft bei Normaldruck erfüllt (Tipler, 1994).

$$PV = CT \quad C = \text{const.} \quad (2.3)$$

2. Messanordnung

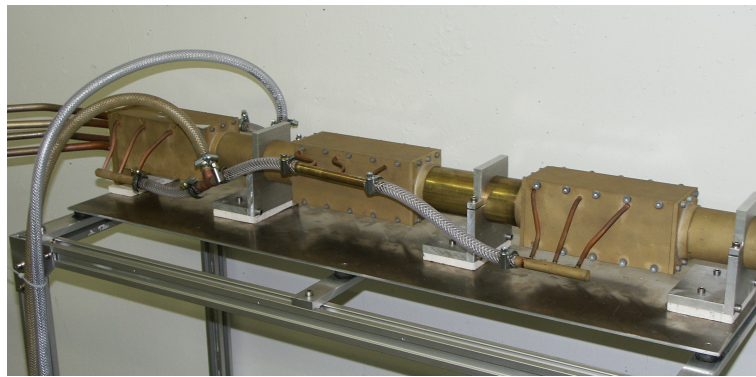


Abbildung 2.14.: Kühleinheit.

Die heiße Luft der Heizung wird durch wasserführende Rohre abgekühlt, um somit die Saugleistung zu steigern und eine Überhitzung der Absaugung zu vermeiden.

Geht man von einem konstanten Druck aus, so sieht man, dass das Luftvolumen direkt proportional zur absoluten Temperatur ist.

$$V \propto T \quad (2.4)$$

Im Fall der hier beschriebenen Heizung bedeutet dies: die Temperatur der Luft, die den Heizring verlässt, ist mindestens so hoch wie die Probertemperatur. Als Beispiel werden 330 °C (ca. 600 K) angenommen (dies entspricht der Maximaltemperatur, die in der komplett aufgebauten Apparatur erreicht wurde). Die gemessene Ablufttemperatur betrug nie über 30 °C. Dies entspricht einer Abkühlung um mindestens 300 K, also der Halbierung der absoluten Temperatur im Bereich hinter dem Heizring und damit laut Gleichung 2.4 einer Halbierung des Luftvolumens. Man erreicht somit bei gleichem Volumenstrom durch die Absaugung eine Verdoppelung des Volumenstroms aus dem Ofen heraus.

2.3.5. Heizkurven

In Abbildung 2.15 ist der Verlauf der Temperatur im Ofen über der Zeit für einige ausgewählte Versuche aufgetragen. Man erkennt, dass die Steigung der Temperaturkurven bei allen Versuchen zu Beginn sehr ähnlich ist. Die Endtemperatur steigt jedoch mit jeder Erhöhung der Saugleistung. Interessant ist auch der Vergleich der Kurven 3 und 4. Erstere erreicht eine deutlich niedrigere Endtemperatur, obwohl nur der halbe Ring beheizt wurde. Dies zeigt, dass die transportierte Luftmenge der entscheidende Faktor für eine hohe Endtemperatur ist. Durch die Nutzung von nur zwei der vier Heißluftführung halbiert sich der Querschnitt. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Rings wird viel Wärme in die andere Hälfte transportiert, so dass sich effektiv doch der ganze Ring erwärmt. Dies führt zu der beobachteten, um ca. 70 K geringeren Endtemperatur.

Desweiteren erkennt man, dass die Verluste durch die längeren Zuleitungen und der größere Strömungswiderstand durch Verbindungs- und Winkelstücke nach dem Einbau des Heizrings in das Gerät zu einer etwas langsameren Aufheizung sowie einer Reduzierung der Endtemperatur von 400 °C auf 330 °C führten (Kurven 5 und 7, Abbildung 2.15). Ein messbarer Einfluss der Sensorhalterkühlung auf das Heizverhalten konnte durch Vergleich von Heizkurven mit und ohne Sensorhalter ausgeschlossen werden.

2. Messanordnung

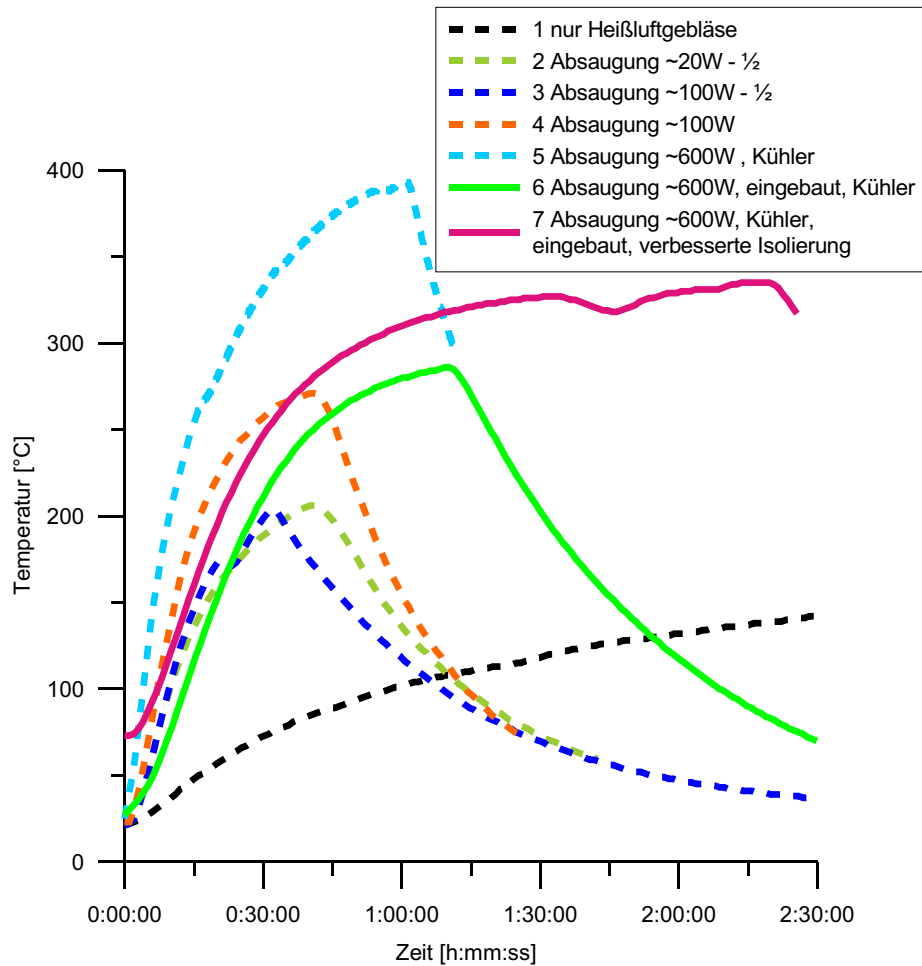


Abbildung 2.15.: Heizkurven.

Die gestrichelten Kurven zeigen Versuche vor dem Einbau des Heizrings in das Gerät, die durchgezogenen danach. Bei den mit 1/2 gekennzeichneten Versuchen wurde nur der halbe Ring beheizt.

2.4. Elektronik

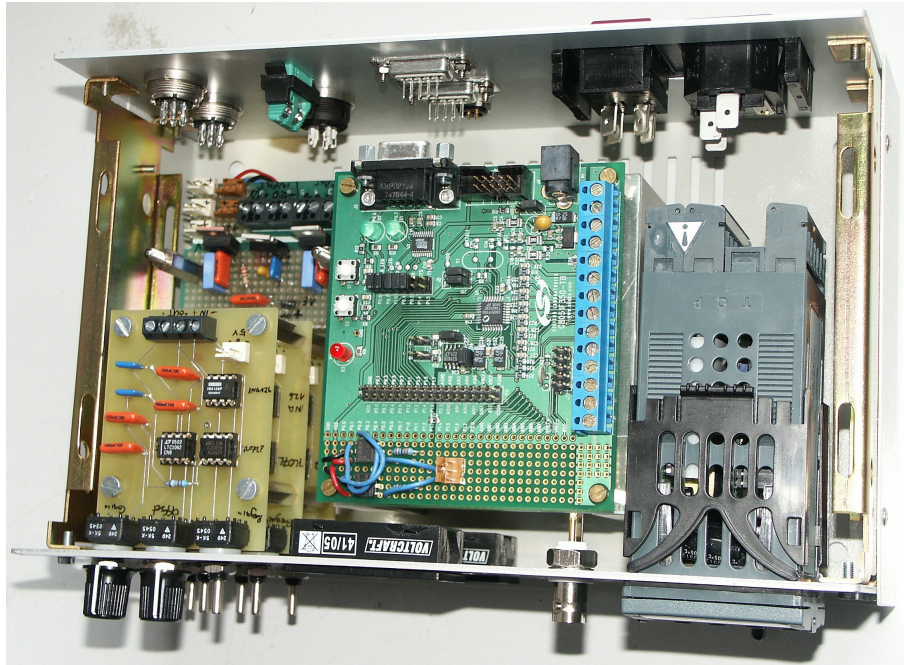


Abbildung 2.16.: Haupteinheit der Elektronik.

Noch nicht verkabelt. Wichtigste Einheiten von links nach rechts: Signalverstärkung und -filterung, Mikroprozessorplatine, Eurotherm-Regler.

Die Einstellung der Rotationsgeschwindigkeit, sowie die Ströme durch die Helmholtz Spulen (siehe 2.2.1) erfolgt manuell mit Standard-Labornetzteilen, da während der Messung keine Veränderung erforderlich sein dürfte und eine automatische Regelung damit zu aufwändig wäre. Interessant wäre allenfalls eine sehr schnell reagierende Regelung der Feldkompensation, um damit die Messung störende externe Feldschwankungen aktiv zu kompensieren wie von Buncick et al. (1983) beschrieben. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit wurden diese Störungen insbesondere durch die Straßenbahnlinie in unmittelbarer Nähe des Labors, sowie die Maschinen der sich direkt über dem Labor befindlichen Werkstatt hervorgerufen (siehe Abschnitt 7.1). Auf den dafür erforderlichen hohen technischen Aufwand wurde ver-

zichtet, da mittelfristig ein Standortwechsel des Geräts in das wesentlich störungsfreiere magnetische Laboratorium in Niederlippach geplant ist.

2.4.1. Haupteinheit

Zur besseren Handhabung sowie zum störungsfreien Betrieb wurden alle losen Komponenten in das in Abbildung 2.16 gezeigte Gehäuse aus Metall integriert. Dies sorgt außerdem für die Abschirmung von externen Störungen. An der Frontseite befinden sich die drei mal drei Potentiometer der Filter- und Verstärkungselektronik (siehe Abschnitt 2.4.3) sowie das Bedienteil des Eurotherm-Reglers (siehe Abschnitt 2.4.5). Darüber hinaus wurden BNC-Buchsen zum direkten Abgreifen der Ein- und Ausgangssignale integriert und Anzeigen für die Messsignale sowie die Probenposition vorgesehen. Auf der Rückseite befindet sich der Ein-Aus-Schalter mit integrierter Sicherung sowie Steckanschlüsse für die Sensoren, die Kommunikation mit dem PC zur Datenaufzeichnung, den Drehgeber, den Temperatursensor, die Netzspannung und das Steuerkabel für das Heißluftgebläse. Die logischen Verbindungen der eingesetzten Komponenten sind in Abbildung 2.17 gezeigt. Wegen der besseren Übersicht sind das verwendete ± 12 V Linearnetzteil sowie die Schaltung zur Erzeugung, der für die einzelnen Komponenten benötigten Spannungen, nicht dargestellt. Letzteres wurde mit Festspannungsreglern vom Typ 78XX (siehe Datenblatt [78XX]) für positive und 79XX (siehe Datenblatt [79XX]) für negative Spannungen realisiert. Die Schaltpläne der Hilfsspannungsversorgung sowie anderer selbst entworfener Schaltungen finden sich in Anhang E. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Komponenten detaillierter beschrieben.

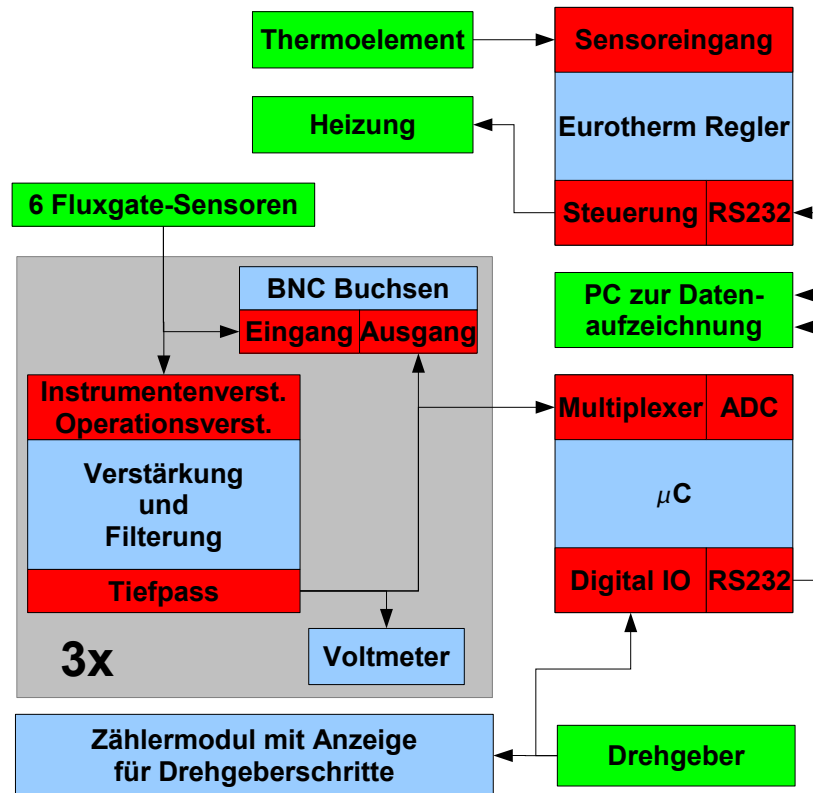


Abbildung 2.17.: Logische Verbindungen der Elektronikkomponenten. Die grün dargestellten Einheiten sind nicht im Gehäuse der Haupteinheit eingebaut. Der grau hinterlegte Teil wurde für jeden der drei differenziellen Kanäle aufgebaut. Das Netzteil sowie die Schaltung zur Erzeugung der benötigten Hilfsspannungen sind nicht dargestellt.

2.4.2. Sensoren

Die verwendeten Sensoren vom Typ MAG-03 stammen von Bartington Instruments (siehe Firmenverzeichnis in Anhang A) und besitzen einen Messbereich von $\pm 70 \mu\text{T}$. Das Ausgangssignal ist eine dem Magnetfeld proportionale Spannung von $\pm 10 \text{ V}$. Dies entspricht einem Ausgangssignal von 0,14 Millivolt pro Nanotesla. Die Sensoren wurden vom Hersteller kalibriert und benötigen eine Versorgungsspannung von $\pm 12 \text{ V}$. Desweiteren handelt es sich um besonders rauscharme Versionen der Sensoren.

Zum Einsatz kommen zwei Sensor-Tripel mit jeweils eigener Ansteuerungselektronik, wie in Abbildung 2.18 gezeigt. Ein Tripel wurde für die Sensoren X_1 , Y_1 und Z_1 verwendet, das andere entsprechend für X_2 , Y_2 und Z_2 . Details über die Sensorbenennung und ihre Anordnung finden sich in Abschnitt 4.3.

Die einzelnen Sensoren sind in Zylinder von 5 mm Durchmesser und 25 mm Länge aus Epoxy eingegossen und mit einem Flachbandkabel fest mit der Ansteuerungselektronik verbunden. Diese verfügt über einen 10poligen Hirose Stecker zum Anschluss der Versorgungsspannung sowie zum Abgreifen der drei Sensorsignale (vgl. Betriebsanleitung [MAG03]).



Abbildung 2.18.: Fluxgate-Sensor-Tripel mit der zugehörigen Elektronik. Es kommen zwei solcher Tripel zum Einsatz.

2.4.3. Verstärker- und Filterschaltung

Um die sehr kleinen Differenzspannungen ($0,14 \text{ mV/nT}$) der Sensorpaare messen zu können, müssen diese verstärkt werden. Dazu wurden pro Kanal eine, also insgesamt drei identische Schaltungen aufgebaut. Bei der geplanten Umlaufdauer der Proben von ca. 10 s und dem erwarteten Verlauf der Sensorsignale innerhalb einer viertel Umdrehung (siehe Abschnitt 3.4) liegen die erwarteten Signalfrequenzen im Bereich von $4/10 \text{ s} = 0,4 \text{ Hz}$. Da Störungen erst ab einer Frequenz von 50 Hz durch die Netzspannung bzw. bei höheren Frequenzen durch die Fluxgate-Elektronik zu erwarten sind, wurde zur Verbesserung der Signalqualität ein Tiefpass fünfter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz integriert. Durch den großen Abstand zu den Signalfrequenzen wird die negative Beeinflussung des Nutzsignals minimiert. Die aufgebaute Schaltung erlaubt die Einstellung des Verstärkungsfaktors sowie eine Offsetkorrektur. Der vollständige Schaltplan findet sich in Abbildung E.1. Das erstellte Platinenlayout ist in Abbildung E.2 gezeigt.

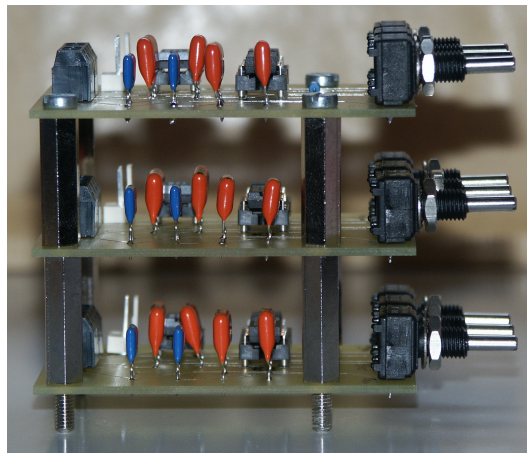


Abbildung 2.19.: Fertig aufgebaute Signalverstärker und -filter. Es handelt sich um drei identische Einheiten, für jeden Kanal eine.

Tiefpass

Als Tiefpass fünfter Ordnung kommt ein Spezial-IC vom Typ LTC1062 des Herstellers Linear Technology zum Einsatz (siehe Datenblatt [LTC1062]). Ein baugleicher IC wird unter der Bezeichnung MAX280 von Maxim vertrieben. Eine Besonderheit dieses Bausteins ist die Ankopplung an das zu filternde Signal über Kondensatoren ($C1$, $C2$). Dies schließt eine Beeinflussung des Gleichspannungsanteils des Sensorsignals aus. Die Dimensionierung der Kondensatoren $C1$ und $C3$ sowie des Widerstands $R1$ bestimmt das Frequenzverhalten des ICs. Die interne Frequenz f_{OSC} wird durch $C3$ nach Formel 2.5 festgelegt (siehe Datenblatt [MAX280]).

$$f_{OSC} = 140\text{kHz} \left(\frac{33\text{pF}}{33\text{pF} + C3} \right) \quad (2.5)$$

Mit $C3 = 4700 \text{ pF}$ ergibt sich eine interne Frequenz von 976 Hz. Die Grenzfrequenz des Filters f_C beträgt ein Hundertstel dieser Frequenz und somit knapp 10 Hz. Um die Verfälschung des Signals unterhalb der Grenzfrequenz möglichst gering zu halten, wurden die externen Bauteile so dimensioniert, dass sich ein möglichst flacher Frequenzgang ergibt. Dies wird durch das Erfüllen der Bedingung 2.6 gewährleistet (siehe Datenblatt [MAX280]). Mit den bestmöglich passenden Bauteilwerten von $27 \text{ k}\Omega$ für $R1$ und $1 \text{ }\mu\text{F}$ für $C1$ ergibt sich ein Wert von 1,66 anstatt der geforderten 1,62. Dies entspricht einer Abweichung von 2,5% und liegt damit deutlich unterhalb der Fertigungstoleranzen der meisten verwendeten Bauteile. Darüber hinaus zeigt Abbildung 2.20, dass sich der Frequenzgang erst bei deutlich größeren Abweichungen signifikant ändert.

$$\frac{f_C}{1,62} = \frac{1}{2\pi R1 C1} \quad (2.6)$$

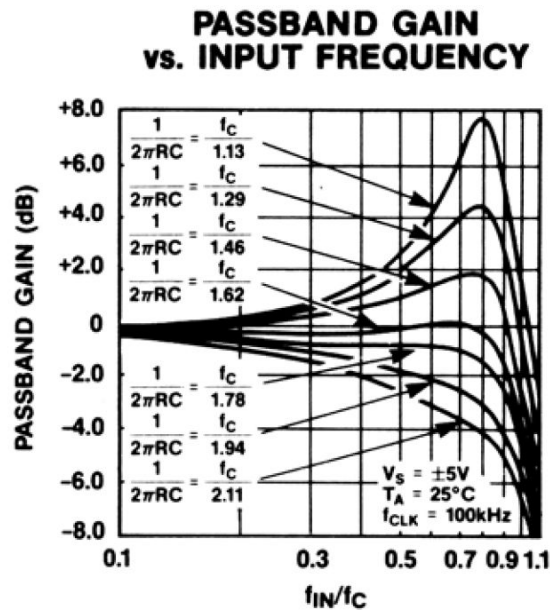


Abbildung 2.20.: Frequenzverhalten des eingesetzten Tiefpassfilters. Der Frequenzgang hängt von der Dimensionierung der externen Bauteile ab. Wünschenswert ist ein möglichst flacher Frequenzgang, um eine Verfälschung des Signals bei tiefen Frequenzen zu vermeiden. Aus Datenblatt [MAX280].

Signalverstärkung

Die Verstärkung erfolgt in zwei Stufen mit einem Instrumentenverstärker vom Typ INA126 von Burr-Brown Products sowie einem weiteren Operationsverstärker vom Typ TL072 von Texas Instruments. Der INA126 verstärkt direkt die Spannungsdifferenz der beiden angeschlossenen Sensorsignale. Der Verstärkungsfaktor wird durch die Einstellung des Potentiometers R_X1 festgelegt. Die Wahl fiel auf einen Instrumentenverstärker, da diese einen sehr großen Verstärkungsbereich sowie einen sehr hochohmigen Eingang bieten und somit die zu messenden Signale nicht verfälschen. Des weiteren werden durch die sehr gute Gleichtaktunterdrückung Störungen, die an beiden Eingängen gleichzeitig auftreten, eliminiert (Horowitz und Hill, 1989).

Der IC TL072 enthält zwei identische Operationsverstärker in einem Gehäuse. Der eine wird benutzt, um die mit dem Potentiometer R_X2 eingestellte Offsetkorrektur hochohmig an den entsprechenden Eingang des INA126 weiterzugeben. Der andere dient der Nachverstärkung des von dem Instrumentenverstärker gelieferten Signals. Der Verstärkungsfaktor wird durch das Potentiometer R_X3 bestimmt.

Dieser zweistufige Ansatz wurde gewählt, um zum Einen die hervorragenden Eigenschaften eines Instrumentenverstärkers sowie die im Fall des INA126 vorhandene Offsetkorrektur ausnutzen zu können. Zum Anderen lässt sich durch die Nachverstärkung mit dem Operationsverstärker eine wesentlich größere Verstärkung des eigentlichen Differenzsignals erreichen, da ggf. vorhandene Offsets, die wesentlich größer als das eigentliche Messsignal sein können, nicht mitverstärkt werden müssen. Darüber hinaus ist die Einstellung durch die Unabhängigkeit von der Offsetkorrektur einfacher. Die drei Potentiometer R_X1, R_X2 und R_X3 sind über Drehknöpfe an der Frontplatte zugänglich. Es kamen hochwertige Ausführungen aus Cermet (vgl. Datenblatt [CERMET]) zum Einsatz.

2.4.4. Mikroprozessoreinheit

Zur Digitalisierung der Messwerte sowie zur Auswertung der Impulse des Drehgebers kommt eine fertig aufgebaute Einheit aus einem 8051 kompatiblen Mikroprozessor und einem 24 bit Analog-Digital-Wandler (ADC) von Silicon Laboratories (siehe Firmenverzeichnis in Anhang A) zum Einsatz.

Die in der Programmiersprache C geschriebene Firmware des Mikroprozessors wird im Abschnitt 6.3 näher vorgestellt. Sie übernimmt die Ansteuerung des ADCs und des vorgeschalteten Multiplexers sowie das Mitzählen der Position aus den Signalen des Drehgebers. Bei jedem der 500 Drehgeberschritte wird ein vollständiger Datensatz aus absoluter Position sowie die über die Zeitdauer des letzten Schrittes gemittelten Werte der drei verstärkten und gefilterten Gradientensignale zweier Sensoren über die serielle Schnittstelle ausgegeben. Diese Daten werden zusammen mit den

2. Messanordnung

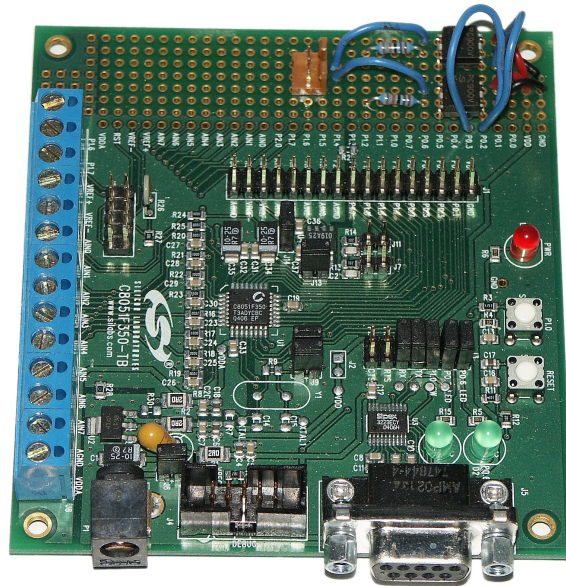


Abbildung 2.21.: Platine des Mikroprozessors.
Integriert ist außerdem ein 24bit ADC mit vorgeschaltetem Multiplexer zur Digitalisierung analoger Spannungsdifferenzen.

Temperaturdaten des Eurotherm Reglers auf dem PC zur späteren Auswertung kontinuierlich abgespeichert (siehe Abschnitt 6.1).

Die Ankopplung der analogen Signale erfolgt direkt über die dafür vorgesehenen Klemmen auf der Platine (siehe 2.21). Die zwei digitalen Signale des Drehgebers wurden aufgrund des zu hohen Pegels mit je einem Optokoppler vom Typ PC900 der Firma Sharp mit Eingängen des Mikroprozessors verbunden (siehe Datenblatt [PC900]). Der Aufbau erfolgte direkt auf dem für eigene Erweiterungen vorgesehenen Lochrasenfeld der Mikroprozess Platine (in Abbildung 2.21 rechts oben).

2.4.5. Eurotherm-Regler

Zur Regelung der Temperatur kommt ein Regler vom Typ 2216e der Firma Eurotherm zum Einsatz (siehe Firmenverzeichnis in Anhang A). Der Regler verfügt über einen Eingang für einen Temperatursensor, einen Schaltausgang (0/18 V) zur Ansteuerung der Heizung sowie eine serielle Schnittstelle nach dem RS232 Standard zum Datenaustausch mit dem Steuerrechner.

Er arbeitet nach dem PID-Prinzip. Dieses bietet in vielen Fällen das optimale Reglerverhalten und bedeutet, dass in die Stellgröße $Y(t)$ (in diesem Fall die Heizleistung) ein proportionaler (P), integraler (I) und differentieller (D) Anteil der Regelabweichung $X_d(t)$ (in diesem Fall die Differenz zwischen gewünschter Temperatur und gemessener Proben temperatur) eingeht. Damit folgt die Stellgröße folgender Gleichung (Dembowski, 1993).

$$Y(t) = K_p X_d(t) + K_i \int_{t-t_1}^t X_d(t) dt + K_d \frac{dX_d(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Um ein optimales Regelverhalten mit schneller Reaktion auf Sollwertabweichungen und ohne Überschwingen zu erhalten, müssen die Konstanten K_p , K_i und K_d entsprechend gewählt werden. Diese lassen sich am besten experimentell ermitteln. Der Eurotherm-Regler bietet eine entsprechende automatische Funktion um sein Regelverhalten zu optimieren (siehe Betriebsanleitung [2216e]).

Die Ansteuerung der Heizung erfolgt durch Pulsbreitenmodulation. Dies bedeutet, dass die Leistung durch das Verhältnis von Ein- und Ausschaltzeit bestimmt wird. Die Zeiten liegen im Sekundenbereich, verursachen jedoch aufgrund der thermischen Trägheit des Systems keine nennenswerten Temperaturschwankungen der Proben.

Temperatursensor

Als Temperatursensor kommt ein Thermoelement vom Typ K zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine mechanische Verbindung einer Chrom-Nickel-Legierung mit

reinem Nickel. Diese Verbindung liefert eine von der Temperatur abhängige Kontaktspannung von $40,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (im Bereich von $0\text{-}100^\circ\text{C}$) (Dembowski, 1993) und ist bis zu 1300°C einsetzbar (Bernstein und Blank, 1993). Dieser Effekt kommt aufgrund der unterschiedlichen Austrittsarbeit der Elektronen beider Materialien zustande (Schrüfer, 2004).

Um die Temperaturmessung nicht zu verfälschen, wurden sämtliche Kabel und Steckverbindungen vom Thermoelement bis zu den Anschlussklemmen des Eurotherm Reglers mit speziell dafür vorgesehenen Komponenten realisiert. Diese stellen durch Verwendung der gleichen Materialien wie im Thermoelement sowie lötfreie Anschlüsse sicher, dass sich keine weiteren Kontaktspannungen zu der zu messenden Thermospannung addieren. Da die Kennlinie der Thermospannung nicht über den gesamten Messbereich linear ist, erfolgt die Umrechnung in eine Temperatur mit Hilfe einer im Regler integrierten Korrekturtabelle (siehe Betriebsanleitung [2216e]). Der Temperatursensor weist eine im Vergleich zu den Proben starke remanente Magnetisierung auf, die möglicherweise auf die Schutzhülle des Sensors, vermutlich jedoch auf das ferromagnetische Nickel zurückzuführen ist. Deren Einfluss auf die Messung wird im Abschnitt 7.3 diskutiert. Eine Möglichkeit zur Vermeidung einer solchen Magnetisierung könnte in der Verwendung eines Thermoelements vom Typ R oder S liegen. Diese decken den erforderlichen Temperaturbereich ab und bestehen aus einer Platin-Rhodium-Legierung sowie Platin und sollten somit unmagnetisch sein.

Um das Temperaturverhalten des Sensors dem von Gesteinsproben anzupassen, wurde eine künstliche Probe aus Pyrophyllit gefertigt und mit einer Bohrung zur Aufnahme des Sensors versehen. Diese Probe wird von oben auf das Thermoelement gesteckt und bewegt sich genau wie die anderen Proben auf einer Kreisbahn durch den Ofen.

3. Mathematische Grundlagen

3.1. Verwendete Symbole

x, y, z	Koordinatensystem des Geräts
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	Koordinatensystem der Probe
D	Deklination der Probenmagnetisierung
I	Inklination der Probenmagnetisierung
ϕ	Drehwinkel der Probenplattform
\vec{M}	Magnetisierung [A/m]
M	Betrag der Magnetisierung [A/m]
\vec{m}	magnetisches Dipolmoment [Am ²]
\vec{B}	magnetisches Außenfeld der Probe [T]
μ_0	magnetische Feldkonstante $4\pi \cdot 10^{-7}$ [Vs/Am]

Tabelle 3.1.: Verwendete Symbole.

Alle Rechnungen sind im SI-System durchgeführt (Tabelle 3.1).

3.2. Magnetisches Außenfeld einer Probe

Zur Berechnung und Auswertung der Daten wird angenommen, dass das Streufeld der zu messenden Proben einem reinen Dipolfeld entspricht und keine Terme höherer Ordnung enthält. Dies ist bei kugelförmigen, homogen magnetisierten Proben gegeben und auch bei den hier verwendeten Standard-Inch-Proben in erster Näherung

erfüllt (Collinson, 1983). Eine Verschiebung der Lage des Dipols lässt sich durch eine entsprechende Veränderung der Sensorkoordinaten bei der Auswertung der Messwerte kompensieren. Geschieht dies nicht, treten wie bei der Abweichung von der oben beschriebenen idealen Probenform höhere Feldanteile auf. Diese machen sich als Abweichung der Messsignale und somit als ein Anstieg der Fehlerquadratsumme bei der Analyse der Messdaten (Kapitel 5) bemerkbar.

3.2.1. Koordinatensysteme

Das Koordinatensystem einer Probe (\hat{x} , \hat{y} , \hat{z}) wird wie in Abbildung 3.1 dargestellt definiert. Dabei zeigt der auf der Mantelfläche gemalte Pfeil in Richtung der \hat{z} -Achse und legt die Orientierung der \hat{x} - und \hat{y} -Achse fest (Soffel, 1991).

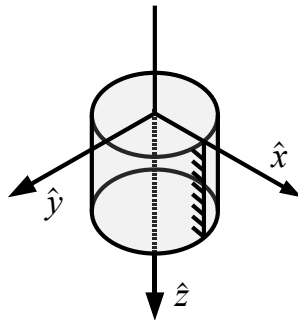


Abbildung 3.1.: Definition der Kernkoordinaten einer Probe.

3. Mathematische Grundlagen

Als Basis für die Berechnungen wurde ein weiteres Koordinatensystem (Gerätekoordinatensystem (x, y, z)) so gewählt, dass dessen Achsen und die Achsen der Kernkoordinaten um den Rotationswinkel der Probenplattform ϕ verdreht sind (siehe Abbildung 3.2).

Dies bedeutet insbesondere

$$\left. \begin{array}{l} \hat{x} \parallel x \\ \hat{y} \parallel y \\ \hat{z} \parallel z \end{array} \right\} \text{für } \phi = 0 \quad (3.1)$$

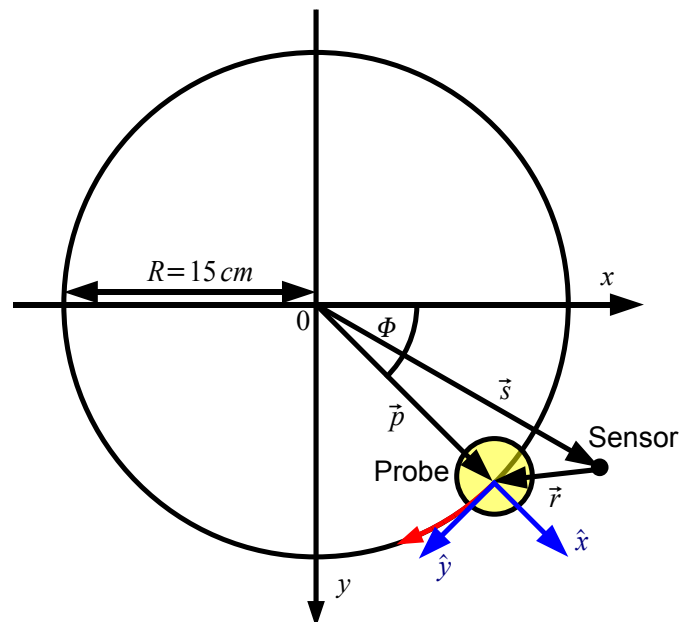


Abbildung 3.2.: Definition des gewählten Gerätekoordinatensystems. Ansicht von oben in Richtung der positiven z-Achse.

Der Koordinatenursprung liegt im Schnittpunkt der Probenebene mit der Rotationsachse. Die z-Achse des gewählten rechtshändigen Koordinatensystem zeigt senkrecht nach unten und entspricht damit der üblichen Konvention in der Geophysik.

Der Vektor \vec{r} zeigt vom Sensor zur Probe und ist somit als Differenz der Probenposition $\vec{p}(\phi)$ und der Sensorposition \vec{s} definiert. Er ist die entscheidende Größe zur Berechnung des Streufeldes der Probe an der jeweiligen Sensorposition.

$$\vec{p}(\phi) = \begin{pmatrix} R \cdot \cos \phi \\ R \cdot \sin \phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$\vec{r} = \vec{p} - \vec{s} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cdot \cos \phi - s_x \\ R \cdot \sin \phi - s_y \\ -s_z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

3.2.2. Probenmagnetisierung

Die Magnetisierung \vec{M} einer Gesteinsprobe ist als Quotient des magnetischen Dipolmoments \vec{m} und dem Volumen V der Probe definiert.

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (3.5)$$

Die Darstellung der Meßwerte als Magnetisierung liefert ein vom Probenvolumen unabhängiges Ergebnis.

3.2.3. Magnetisches Dipolfeld

Das Fernfeld einer Probe ist durch ihr magnetisches Moment festgelegt (abgesehen von Abweichungen im Nahfeld, die durch die räumliche Verteilung der Magnetisierung zustande kommen).

Das Streufeld eines magnetischen Dipols mit dem Dipolmoment \vec{m} ist gegeben durch (Fließbach, 2000):

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3\vec{r}(\vec{r} \cdot \vec{m}) - \vec{m}r^2}{r^5} \quad (3.6)$$

mit

$$r = |\vec{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}, \quad \vec{m} = \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Daher lässt sich das magnetische Streufeld \vec{B} in Abhängigkeit vom Rotationswinkel ϕ in \vec{m} ausdrücken:

$$\vec{B}(\vec{s}, \phi) = \check{I}(\vec{s}, \phi) \cdot \vec{m} \quad (3.8)$$

Hierbei ist \check{I} folgende 3x3 Matrix:

$$\check{I}(\vec{s}, \phi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r^5} \begin{pmatrix} 2r_x^2 - r_y^2 - r_z^2 & 3r_x r_y & 3r_x r_z \\ 3r_y r_x & 2r_y^2 - r_x^2 - r_z^2 & 3r_y r_z \\ 3r_z r_x & 3r_z r_y & 2r_z^2 - r_x^2 - r_y^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Bei der letzten Matrix in Gleichung 3.9 handelt es sich um eine Drehmatrix, die die Rotation der Probe um ihre eigene Achse beschreibt. Diese Rotation kommt durch die

starre Befestigung der Proben auf der Probenplattform zustande. Würde man hier eine Mechanik wie bei der Befestigung des Temperatursensors (siehe 2.4.5) vorsehen und damit die gebundene Rotation der Proben verhindern, würde diese Matrix zur Einheitsmatrix. Der Vektor \vec{B} beschreibt das erwartete magnetische Feld in den drei Raumrichtungen, wie es an der Position \vec{s} von einer um den Winkel ϕ aus der Nulllage herausgedrehten Probe erzeugt wird. Dies ist die Grundlage der Berechnung von Signalverläufe für gegebene Sensorpositionen. Gleichung 3.9 wird in Kapitel 4 auch zur Optimierung der Sensorpositionen eingesetzt. Umgekehrt wird es durch lineare Regressionsrechnung möglich, aus den gemessenen Signalen das magnetische Dipolmoment der Proben zu bestimmen (siehe Kapitel 5).

3.3. Sensorgleichungen

Nach den Gleichungen 3.8 und 3.9 ergibt sich für einen Sensor, der an der Position \vec{s} das magnetische Feld in x-Richtung misst, folgender Signalverlauf in Abhängigkeit des Drehwinkels der Probe ϕ :

$$\begin{aligned} B_x(\vec{s}, \phi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r^5} & [(\cos \phi (-r_z^2 - r_y^2 + 2r_x^2) + 3 \sin \phi r_x r_y) m_x \\ & + (\sin \phi (-r_z^2 - r_y^2 + 2r_x^2) + 3 \cos \phi r_x r_y) m_y \\ & + 3r_x r_z m_z] \end{aligned} \quad (3.10)$$

Für einen Sensor, der in y-Richtung misst, ergibt sich:

$$\begin{aligned} B_y(\vec{s}, \phi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r^5} & [(\sin \phi (-r_z^2 + 2r_y^2 - r_x^2) + 3 \cos \phi r_x r_y) m_x \\ & + (\cos \phi (-r_z^2 + 2r_y^2 - r_x^2) + 3 \sin \phi r_x r_y) m_y \\ & + 3r_x r_z m_z] \end{aligned} \quad (3.11)$$

Für einen Sensor, der in z-Richtung misst, ergibt sich:

$$\begin{aligned} B_z(\vec{s}, \phi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r^5} & [(3 \sin \phi r_y r_z + 3 \cos \phi r_x r_z) m_x \\ & + (3 \cos \phi r_y r_z + 3 \sin \phi r_x r_z) m_y \\ & + (2r_z^2 - r_y^2 - r_x^2) m_z] \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.4. Eigenschaften der Messsignale

Wie aus Gleichung 3.8 (sowie 3.10 - 3.12) ersichtlich ist, entspricht das zu messende Proben-Streufeld parallel zu den Achsen des Koordinatensystems einer Linearkombination der Komponenten des magnetischen Moments der Probe \vec{m} .

$$B_i = \check{I}_{i1} \cdot m_x + \check{I}_{i2} \cdot m_y + \check{I}_{i3} \cdot m_z \quad (3.13)$$

Es wurden drei Positionen in einem Sektor der x-z-Ebene in einem in der Praxis sinnvollen Abstand von der Probenmitte ausgewählt (vgl. roter Rahmen in Zeichnung 4.1). Es wurde nur ein Sektor berücksichtigt, da relativ zur Probe (für $\phi = 0$) symmetrisch liegende Sensoren qualitativ sehr ähnliche Signale liefern. In Bezug auf die x-y sowie die x-z-Ebene ist der Aufbau exakt symmetrisch (siehe auch Abschnitt 4.1). Für die y-z-Ebene gilt dies nicht, da sich die Probe nicht parallel der y-Achse, sondern auf einer Kreisbahn bewegt. In dem für die Messungen interessanten Winkelbereich sind die Abweichungen der Kreisbahn jedoch so gering, dass sich die Signalverläufe nur wenig unterscheiden, und somit nicht explizit dargestellt werden. Je nach Sektor ergeben sich ggf. Änderungen im Vorzeichen der einzelnen Signalkomponenten.

In Abbildung 3.3 sind die Anteile der drei Komponenten des magnetischen Moments über dem Drehwinkel der Probenplattform an mehreren exemplarisch ausgewählten Sensorpositionen dargestellt. Da sich die Probe für $\phi = 0$ nahezu parallel zur y-Achse bewegt, wurde die y-Komponente der Sensorposition immer gleich Null gewählt. Eine Variation dieser Komponente würde im Nahbereich nur eine zeitliche

Verschiebung des Signals, jedoch keine Veränderung des Verlaufs bzw. des Informationsgehalts bewirken.

Die Signale werden über einen Winkelbereich von ± 100 Drehgeberschritten gezeigt, dies entspricht einem Winkel von $\pm 72^\circ$. Sie wurden mit der dafür geschriebenen Matlab-Routine „hotspin_plot_I“ (siehe Quelltext B.5 in Anhang B) erzeugt. Man erkennt beispielsweise, dass das Signal eines in z-Richtung orientierten Sensors an der Position \vec{s}_2 ausschließlich von der z-Komponente der Magnetisierung der gemessenen Probe bestimmt wird.

Betrachtet man eine Inch-Probe mit einer Magnetisierung von 1 A/m an den Sensorpositionen $\vec{s}_{1...3}$, so verursacht diese Amplituden von wenigen Nanotesla. Nach Gleichung 3.5 besitzt eine solche Probe ein magnetisches Moment von ca. $1 \cdot 10^{-5} \text{ Am}^2$. Multipliziert man dieses entsprechend Gleichung 3.13 mit den Amplituden in Abbildung 3.3 von ca. 10^{-4} Vs/Am^4 , so erhält man die oben genannte Größenordnung von $10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot 10^{-4} \text{ Vs/Am}^4 = 10^{-9} \text{ T} = 1 \text{ nT}$.

3. Mathematische Grundlagen

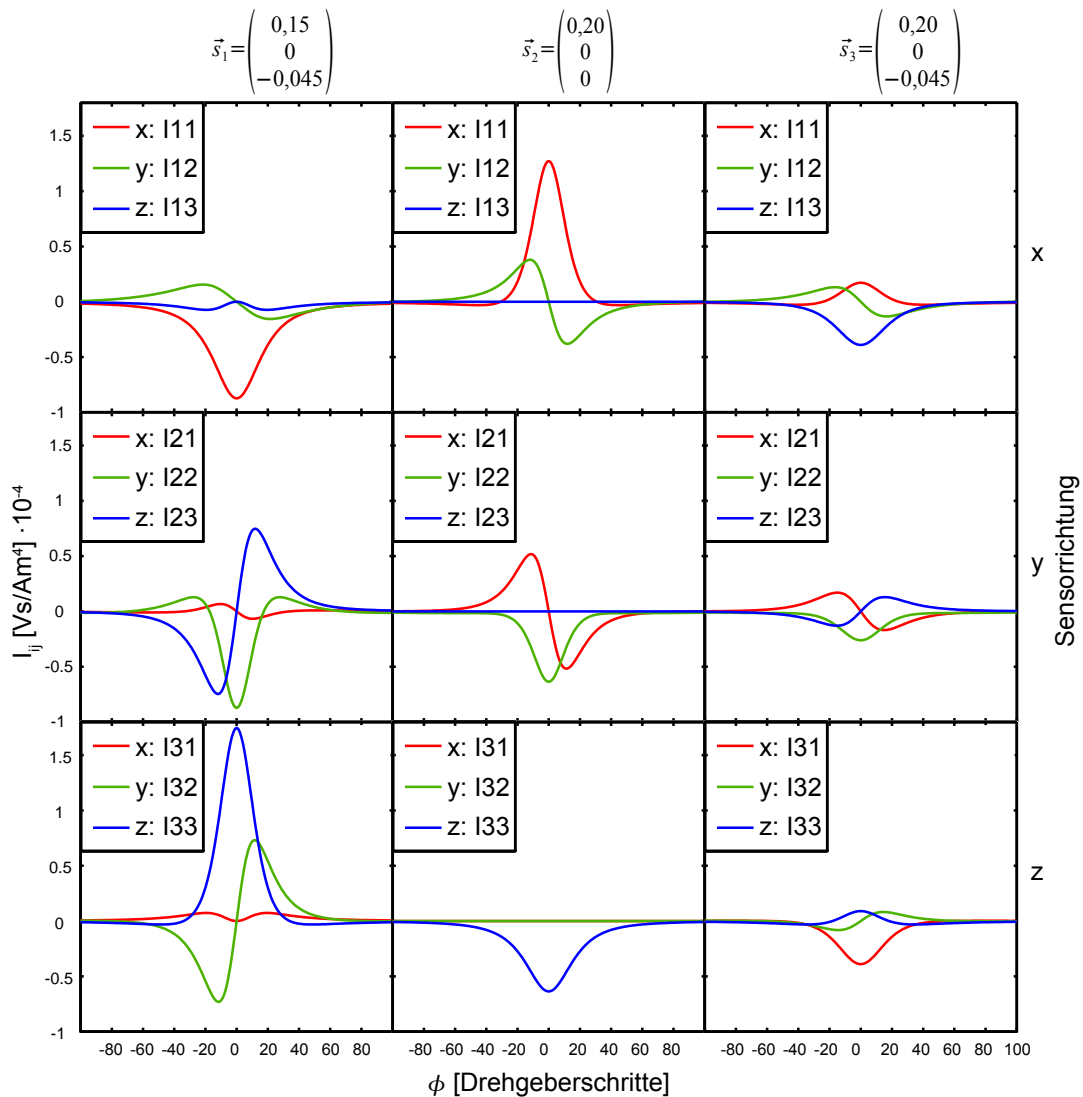


Abbildung 3.3.: Komponenten der Sensorsignale.

An drei verschiedenen Positionen für Sensoren, die in x-, y- und z-Richtung orientiert sind. Das Messsignal ergibt sich als eine Linearkombination der jeweils drei gezeigten Kurven, gewichtet mit den Komponenten des magnetischen Dipolmoments der Probe (Gleichung 3.13). Die Sensorkoordinaten $\vec{s}_{1...3}$ sind in Metern angegeben.

4. Optimierung der Sensorgeometrie

4.1. Anforderungen

Die geometrischen Lage der Sensoren wurde nach den unten aufgezählten Kriterien ausgewählt. Es wurden Einzelpositionen statt der vollständigen Gradientenanordnung betrachtet, da der zweite Sensor nur zur Kompensation von Hintergrundstörungen dienen soll, ohne entscheidenden Einfluss auf das Nutzsignal zu nehmen. Ein Ausnahme stellt die Anordnung der beiden z-Sensoren dar (siehe Abschnitt 4.3). Bei der Auswertung der Daten wurden alle Sensorpositionen berücksichtigt (siehe Abschnitt 5).

- Trennung der einzelnen Magnetisierungskomponenten der Probe. D.h., dass von verschiedenen Sensoren möglichst verschiedene Magnetisierungskomponenten gemessen werden sollen. Dies macht die Daten und deren Auswertung anschaulicher und ermöglicht somit eine bessere Fehlersuche bzw. Justage des Sensorhalters.
- Maximale Signalamplitude. Dies ist wichtig, um eine möglichst hohe Empfindlichkeit des Messgeräts zu erzielen.
- In der Praxis einfach umsetzbar. Das bedeutet insbesondere, dass sich mehrere Sensoren nicht überschneiden dürfen. Ungünstig sind auch Anordnungen, in denen zwei Sensoren auf einer gemeinsamen Achse liegen, da dies die Kabelführung erschwert. Des Weiteren sollte die Grenzfläche zwischen Sensorhalter

4. Optimierung der Sensorgeometrie

und Heizring so klein wie möglich gehalten werden, um die thermische Isolation zu optimieren.

- Jeweils zwei Sensoren müssen die gleiche Ausrichtung haben, um eine Gradientenmessung und somit eine Kompensation von Hintergrundstörungen, die an beiden Sensoren gleichermaßen auftreten, zu gewährleisten.

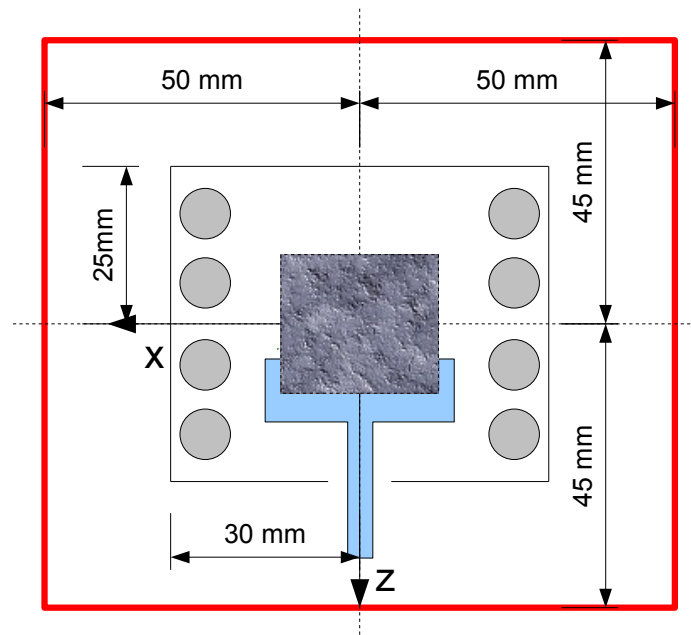


Abbildung 4.1.: Mindestabstand der Sensoren von der Probe.

Dieser wird mechanisch durch den Querschnitt des Heizrings sowie dessen Isolierung bestimmt.

Trotz all dieser Forderungen bleiben viele Anordnungsmöglichkeiten der sechs Sensoren übrig. Deshalb wurde als weitere Einschränkung die Ausrichtung der Sensoren entlang der Koordinatenachsen des Geräts eingeführt. Dies reduziert insbesondere den Rechenaufwand bei der Auswertung der Daten, da jedem Sensorsignal genau eine Komponente des Vektors \vec{B} aus Gleichung 3.8 entspricht und die anderen Kom-

ponenten somit gar nicht in die Auswertung mit einbezogen werden müssen. Ferner wurde die Eigenschaft der Signale ausgenutzt, dass sich die Beiträge der x - und y -Komponenten des magnetischen Moments der Probe bei einer Sensoranordnung symmetrisch zur x - y -Ebene des Geräts und einer Orientierung der Sensoren entlang der x - oder y -Achse genau aufheben und somit nur der doppelte Beitrag der z -Komponente des magnetischen Moments übrig bleibt. Dies sieht man leicht in den Gleichungen 3.10 und 3.11, da r_z in den Vorfaktoren von m_x und m_y nur quadratisch vorkommt und sich somit bei der Differenzbildung zweier Sensoren nur das Produkt mit m_z erhalten bleibt.

4.2. Amplitudenverlauf

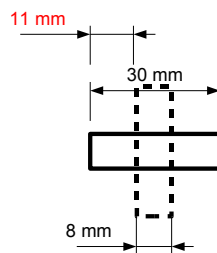


Abbildung 4.2.: Geometrischer Offset der Sensoren.

Die zur Probe tangentielle Sensororientierung erlaubt im Vergleich zur radialen Orientierung eine Montierung mit 11 mm geringerem Abstand zwischen Proben- und Sensor-Mittelpunkt.

Um eine Anordnung zu finden, die die oben genannten Anforderungen erfüllt, wurden die Amplituden der Messkurven für die einzelnen Komponenten, wie sie in Abbildung 3.3 dargestellt sind, an zur Probe mechanisch nächst möglichen Positionen betrachtet (Abbildung 4.4). Dies entspricht aufgrund der Bauform des Heizrings und dem zur Isolation benötigten Abstand einer vertikalen Distanz von 50 mm und einer

horizontalen von 45 mm zum Mittelpunkt der Probe. Dies ist in Abbildung 4.1 veranschaulicht.

Bei der Betrachtung der Amplituden wurde auch berücksichtigt, dass eine Drehung des Sensors ggf. einen vergrößerten Abstand erfordert. Durch den Abfall des Streufeldes und damit der Amplituden mit der dritten Potenz von r , hat eine Änderung des Abstandes große Auswirkungen auf die Amplituden. Dies tritt bei Sensoren in z-Richtung auf, die sich ober- oder unterhalb der Probe befinden, sowie bei Sensoren in x-Richtung, die sich rechts oder links der Probe befinden. In y-Richtung orientierte Sensoren lassen sich ohnehin nicht radial montieren, da sie sonst mechanisch mit den Proben kollidieren würden. Der zusätzliche Abstand beträgt 11 mm und ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Anhand der Diagramme in Abbildung 4.4 wurden günstige Sensorpositionen gewählt. Die Graphen wurden mit der dafür geschriebenen Matlab-Routine „hot-spin_plot_amp“ (siehe Quelltext B.4 in Anhang B) erzeugt.

4.3. Eigenschaften der endgültigen Geometrie

In Tabelle 4.1 sind die endgültig gewählten Positionen sowie die Ausrichtung der Sensoren zusammengefasst. Basierend auf diesen Vorgaben wurde der Sensorhalter, wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, entworfen und gebaut.

Sensor	x [m]	y [m]	z [m]	Richtung
X_1	0.150	0.000	-0.045	X
X_2	0.150	0.000	-0.095	X
Y_1	0.200	0.000	0.000	Y
Y_2	0.250	0.000	0.000	Y
Z_1	0.180	0.000	-0.045	Y
Z_2	0.180	0.000	0.045	Y

Tabelle 4.1.: Gewählte Anordnung der Sensoren.

4. Optimierung der Sensorgeometrie

Die Wahl der Positionen der Sensoren X_1 und Y_1 werden unmittelbar aus den Graphen der Abbildung 4.4 klar, da hier die x bzw. x und y -Komponenten des magnetischen Moments mit der größten Amplitude gemessen werden können und es zu keiner geometrischen Überschneidung der Sensoren kommt. Die jeweils zweiten Sensoren zur Gradientenmessung (X_2 und Y_2) wurden im ungefähr doppelten Abstand zur Probe platziert. Durch das Abfallen des magnetischen Streufeldes mit der dritten Potenz des Abstandes verringert das Signal des zweiten Sensors das des ersten nur noch um ein Achtel ($1/2^3 = 1/8$). Gleichzeitig ist der Abstand so gering, dass mögliche Hintergrundstörungen bestmöglich gefiltert werden.

Die Wahl der Positionen für die z -Sensoren mag kontraintuitiv erscheinen. Hier wurde jedoch der am Ende des Abschnitts 4.1 diskutierte Effekt ausgenutzt, dass bei symmetrischer Anordnung der in y -Richtung orientierten z -Sensoren nur der doppelte Beitrag der z -Komponente des magnetischen Moments gemessen wird. Dies erlaubt eine hohe Amplitude von $2 \cdot 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ Vs/Am}^4$ des z -Anteils, die fast dem Maximalwert bei $x = 0,15 \text{ m}$ entspricht und außerdem den Einfluss des x - und y -Anteils des magnetischen Moments eliminiert. Die Position $x = 0,15 \text{ m}$ wäre ohnehin nicht möglich, da sich an dieser Stelle bereits der Sensor X_1 befindet. Dies ist auch der Grund, warum die Positionen Z_1 und Z_2 nicht zu kleineren x -Koordinaten verschoben sind.

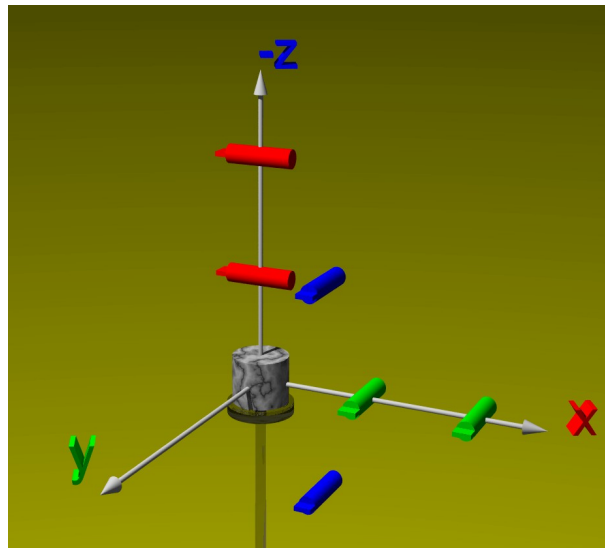


Abbildung 4.3.: Anordnung der sechs Fluxgate-Sensoren.
Die Farben bzw. Sensorbezeichnungen orientieren sich an der am stärksten gemessenen Magnetisierungskomponente (X = rot, Y = grün, Z = blau).

4. Optimierung der Sensorgeometrie

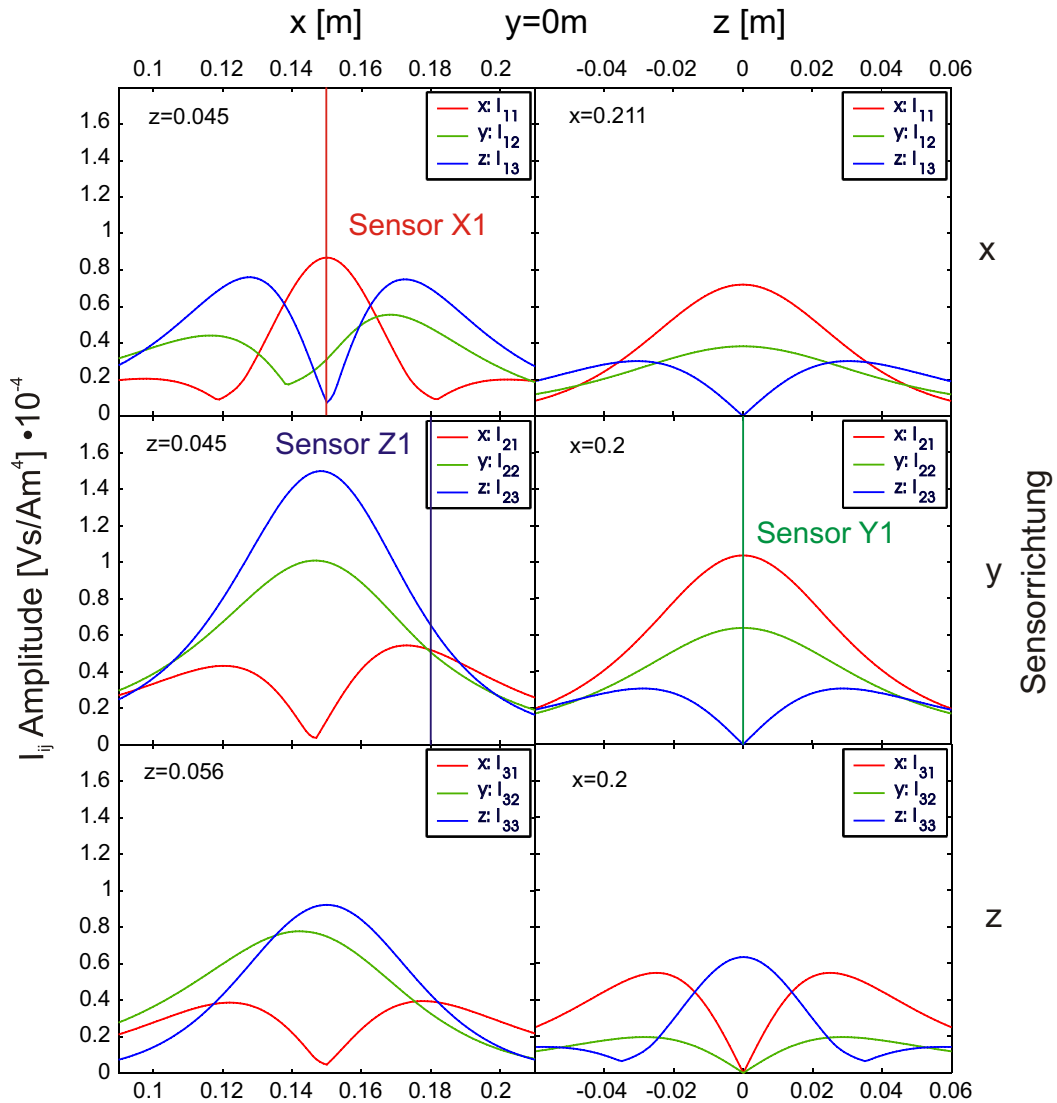


Abbildung 4.4.: Graphische Darstellung der Amplituden der I_{ij} . Diese wurden für einen Winkelbereich von 360° ermittelt. Die senkrechten Linien markieren die gewählten Sensorpositionen.

5. Analyse der Messdaten

Um die Magnetisierung der Probe zu bestimmen, braucht man ein Verfahren, um dasjenige magnetische Moment zu finden, das die gemessenen Signalverläufe mit den geringsten Fehlern erklärt. Zu diesem Zweck wurde ein Ansatz der linearen Regressionsrechnung bzw. Ausgleichsrechnung verwendet (Lang und Pucker, 1998; Bronstein et al., 1999).

5.1. Regressionsrechnung

Ausgangspunkt ist Gleichung 5.1, die den linearen Zusammenhang zwischen den gemessenen Signalverläufen $\vec{W}(\Phi)$ und den gesuchten Komponenten des magnetischen Moments \vec{m} beschreibt.

$$S_{ij}(\phi) \vec{m} = \vec{W}(\phi) \quad (5.1)$$

Die Matrix S_{ij} setzt sich aus Differenzen von Elementen der Matrix $\check{I}(\vec{s}, \phi)$ aus Gleichung 3.9 zusammen und beinhaltet damit die Information über die Positionen sowie Ausrichtungen der Sensoren und legt fest, welche dieser Sensorsignale bei der Gradientenmessung voneinander subtrahiert werden.

Aufgrund der Ausrichtung der Sensoren hat die Matrix $S_{ij}(\phi)$ den in Gleichung 5.2 dargestellten Aufbau. Die gleichen Indizes in Zeile 2 und 3 sind durch die gleiche

5. Analyse der Messdaten

Ausrichtung der Y- und Z-Sensoren in y-Richtung bedingt. Die Bezeichnungen der Sensorpositionen \vec{s} entsprechen denen aus Tabelle 4.1. Dabei gilt $\check{I}_{ij}^{X1} = \check{I}_{ij}(X1, \phi)$:

$$S_{ij}(\phi) = \begin{pmatrix} \check{I}_{11}^{X1} - \check{I}_{11}^{X2} & \check{I}_{12}^{X1} - \check{I}_{12}^{X2} & \check{I}_{13}^{X1} - \check{I}_{13}^{X2} \\ \check{I}_{21}^{Y1} - \check{I}_{21}^{Y2} & \check{I}_{22}^{Y1} - \check{I}_{22}^{Y2} & \check{I}_{23}^{Y1} - \check{I}_{23}^{Y2} \\ \check{I}_{21}^{Z1} - \check{I}_{21}^{Z2} & \check{I}_{22}^{Z1} - \check{I}_{22}^{Z2} & \check{I}_{23}^{Z1} - \check{I}_{23}^{Z2} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Um nun den Wert von \vec{m} zu finden, der die Messkurven am besten erklärt, wählt man folgenden Ansatz zur Minimierung des Integrals über die Fehlerquadrate.

$$\int_{-\phi'}^{\phi'} \sum_{i=1}^3 \left(\sum_{j=1}^3 S_{ij}(\phi) m_j - W_i(\phi) \right)^2 d\phi \stackrel{!}{=} \min \quad (5.3)$$

$$\int_{-\phi'}^{\phi'} \sum_{i=1}^3 \left(\left(\sum_{j=1}^3 S_{ij}(\phi) m_j \right)^2 - 2 \left(\sum_{j=1}^3 S_{ij}(\phi) m_j \right) W_i(\phi) + W_i(\phi)^2 \right) d\phi \stackrel{!}{=} \min \quad (5.4)$$

Durch Nullsetzen der Ableitungen nach allen Komponenten des gesuchten Vektors \vec{m} erhält man ein Gleichungssystem zum Bestimmen des Minimums des Fehlers und den zugehörigen gesuchten Wert von \vec{m} .

$$\frac{\partial}{\partial m_k} \left(\int_{-\phi'}^{\phi'} \sum_{i=1}^3 \left(\left(\sum_{j=1}^3 S_{ij}(\phi) m_j \right)^2 - 2 \left(\sum_{j=1}^3 S_{ij}(\phi) m_j \right) W_i(\phi) + W_i(\phi)^2 \right) d\phi \right) \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.5)$$

$$\int_{-\phi'}^{\phi'} 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 S_{ij}(\phi) S_{ik}(\phi) m_j - 2 \sum_{i=1}^3 S_{ik}(\phi) W_i(\phi) d\phi \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.6)$$

$$\int_{-\phi'}^{\phi'} S_{ij} S_{ik} d\phi m_j = \int_{-\phi'}^{\phi'} S_{ik} W_i d\phi \quad (5.7)$$

$$T_{jk} = \int_{-\phi'}^{\phi'} S_{ij} S_{ik} d\phi \quad (5.8)$$

$$\vec{m} = T_{jk}^{-1} \int_{-\phi'}^{\phi'} S_{ik} W_i d\phi \quad (5.9)$$

Es wurde versucht, durch Integration der Ausdrücke mit dem Programmpaket Mathematica einen analytischen Ausdruck für die Matrix T_{jk} zu finden. Damit sollte der Rechenaufwand bei der routinemäßigen Auswertung der Signale reduziert werden. Dieses Vorgehen führte zu keinem Ergebnis, so dass die oben vorgestellte Rechnung numerisch in der Auswertesoftware (siehe Abschnitt 6.2) implementiert wurde.

5.2. Erweiterung der Regression zur Kompensation linearer Störungen

Bei der Analyse der Messdaten zeigte sich, dass das Probensignal von Störsignalen überlagert wird, die für die Dauer einer Messung (ca. 2 Sekunden) als linear angesehen werden können. Als Ursache für die Störsignale sind externe Feldschwankungen (siehe Abschnitt 7.1) und der mitrotierende Temperatursensor (siehe Abschnitt 7.3) anzusehen.

Um diese Effekte zu kompensieren, wurde der oben beschriebene Ansatz der Regressionsrechnung um sechs zusätzliche Koeffizienten erweitert, für die die Summe der Fehlerquadrate minimiert werden soll. Für jede der drei Messkurven werden somit zusätzlich zwei Koeffizienten a_i und b_i einer überlagernden linearen Funktion bestimmt. Gleichung 5.1 wird zu:

$$S_{ij}(\phi) \vec{m} + \vec{a}\phi + \vec{b} = \vec{W}(\phi) \quad (5.10)$$

Die 3x3 Matrix S_{ij} wird zu einer 3x9 Matrix mit folgendem Aufbau:

$$S'_{ij}(\phi) = \begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \phi & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & S_{ij} & \dots & 0 & \phi & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Der Ergebnisvektor \vec{m} wird damit zu:

$$\vec{m}' = \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \\ a_x \\ a_y \\ a_z \\ b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

Durch dieses Vorgehen konnte die Qualität der Fits wesentlich gesteigert werden.

5.3. Fehler

Als Abschätzung für den Fehler ϵ der Fits wurde die zu minimierende Summe über die Fehlerquadrate benutzt.

$$\epsilon_i = \sum_{-\phi'}^{\phi'} (S_{ij}(\phi) \vec{m} - W_i(\phi))^2 \quad i = x, y, z \quad (5.13)$$

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2} \quad (5.14)$$

Zu beachten ist, dass die Größe des Fehlers ϵ nicht nur von der Qualität der Fits, sondern auch vom betrachteten Winkelbereich sowie der Magnetisierungintensität abhängt. Geht man davon aus, dass sich die Magnetisierung in allen Raumrichtungen gleichmäßig verändert, so verändern sich die Fehlerwerte proportional zur Magnetisierungintensität.

6. Software

In modernen Messgeräten kommt der Software eine immer größere Bedeutung zu. Zum Einen lassen sich heute viele Aufgabenstellungen wie Logikschaltungen oder Regelungen mit programmierbaren Bausteinen wie FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) oder Mikroprozessoren deutlich einfacher und kostengünstiger realisieren, als das früher mit diskreten Bauelementen möglich war. Zum Anderen ermöglicht die heute verfügbare hohe Rechenleistung eines handelsüblichen PCs die Auswertung deutlich komplexerer Messgrößen sowie eine komfortable und flexible Bedienung für den Benutzer.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden drei voneinander unabhängige Softwaremodule entwickelt, die im Folgenden beschrieben werden. Aufgrund des internationalen Umfelds in der Wissenschaft wurde sowohl die Benutzeroberfläche wie auch die Kommentare und Variablennamen in den Quellen in Englisch gehalten.

6.1. Software zur Datenaufzeichnung

6.1.1. Beschreibung der Funktionsweise

Die Software zur Datenaufzeichnung *Hotspin_Main_Control.vi* wurde mit LabView entwickelt und läuft auf einem PC, der über zwei serielle Schnittstellen direkt mit der Haupteinheit der Elektronik (siehe Abschnitt 2.4.1) verbunden ist. Eine Leitung

übernimmt die Kommunikation mit dem Eurotherm-Regler (siehe Abschnitt 2.4.5). Die andere dient zum Auslesen der Messwerte aus dem Mikroprozessor Board (siehe Abschnitt 2.4.4).

Da eine vollständige Darstellung aller mit Labview erstellten Routinen sowohl den Platz einzelner Seiten aufgrund der Komplexität der Diagramme sowie den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, werden nur die wichtigen Routinen vorgestellt. Verzichtet wurde auf die Darstellung der Umsetzung der Benutzeroberfläche sowie die Funktionen zur Kommunikation mit dem Eurotherm Regler, da diese Implementierungen nichts mit der eigentlichen Messung oder der Datenauswertung zu tun haben. Die vollständigen Quellen für Labview Version 6.1 befinden sich auf der beiliegenden CD. Dies gilt auch für alle anderen in Labview programmierten Module sowie den Quelltext für den Mikroprozessor, der auch in Anhang C abgedruckt ist.

Temperaturregelung

Die Software erlaubt es, einen Temperaturverlauf in mehreren Schritten in Form von Zieltemperatur und Heizrate vorzugeben. Diese Werte werden, sobald die letzte Zieltemperatur erreicht wurde, als neue Zieltemperatur und Heizrate an den Eurotherm-Regler geschickt. Die Kommunikation erfolgt mit dem EI-BISYNCH Protokoll (siehe Kommunikationshandbuch [2000ch]) über eine serielle Schnittstelle nach dem RS232-Standard.

Datenerfassung

Die Daten, die vom Mikroprozessor über die serielle Schnittstelle geschickt werden, werden nach jeder vollständigen Umdrehung der Probenplattform kontinuierlich in einer Datei auf der Festplatte abgespeichert (siehe Modul *ADC_Read_Sample.vi*, Abbildung D.1). Damit bleiben diese Daten auch bei Versagen des Computersystems erhalten. Diese Datei lässt sich auch während einer laufenden Messung in die, im nächsten Abschnitt beschriebenen, Software zur Datenanalyse laden und auswerten.

6.2. Software zur Datenanalyse

6.2.1. Beschreibung der Funktionsweise

Das Softwaremodul *Hotspin_Analyzer.vi* wurde ebenfalls mit Labview entwickelt. Damit lassen sich Dateien, die mit der im letzten Abschnitt beschriebenen Software zur Datenaufzeichnung erstellt wurden, auswerten.

Konkret stehen folgende Funktionen zur Verfügung.

- Darstellung des Verlaufs von Soll- und Isttemperatur.
- Darstellung der Rotationsgeschwindigkeit in Umdrehungen pro Minute über der Zeit.
- Einstellung der Probenposition sowie des Winkelbereichs, der zur Datenauswertung genutzt werden soll.
- Einstellung eines Kalibrierungsfaktors für jeden der drei Gradientenkanäle. Diese lassen sich durch Eichproben und dem Anlegen eines identischen Signals an alle Kanäle bestimmen. Außerdem lässt sich pro Kanal ein Offset festlegen. Dieses hat jedoch keine Auswirkung auf die Auswertung der Daten, da es durch die Erweiterung der linearen Regression, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, kompensiert wird.
- Festlegung der Sensorpositionen, die bei der Regressionsanalyse benutzt werden und der Anzahl der Messungen (entspricht der Anzahl der Umdrehungen der Probenplattform), die vor der Analyse gruppenweise gestapelt werden sollen.
- Die Regressionsanalyse der Daten, wie sie im Kapitel 5 vorgestellt wurde, liefert für jeden gestapelten Datensatz die neun Komponenten des Vektors \vec{m} . Im Einzelnen sind dies die drei Komponenten der Magnetisierung sowie die Parameter der linearen Korrekturen. Diese lassen sich sowohl über der Zeit als auch

über der Temperatur darstellen. Auch die Umrechnung in Inklination und Deklination und deren Darstellung in den üblichen Darstellungen wie Zijderveld (Zijderveld, 1967) oder Polar-Diagrammen sowie die Darstellung der Magnetisierungsintensität über der Temperatur wurden implementiert. Eine Abspeicherung dieser Daten zur universellen Weiterverwendung in anderen Programmen ist als Textdatei möglich.

Die Regressionsanalyse der Daten wird durch das in Abbildung D.3 dargestellte Modul *Fit_M.vi* realisiert. Dabei wird durch *Sij.vi* (Abbildung D.2) die Matrix S_{ij} zur Verfügung gestellt und entsprechend, dem in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren, auf die Daten angewendet. Abbildung D.4 zeigt die Umrechnung der x-, y- und z-Komponente der Magnetisierung in die entsprechenden Werte der Inklination, Deklination und Magnetisierungsbetrag.

6.3. Mikroprozessor Firmware

Um die verstärkten und gefilterten elektrischen Signale (siehe 2.4.3) der Fluxgatesensoren zu digitalisieren, kommt eine Mikroprozessorplatine der Firma Silicon Laboratories (siehe Firmenverzeichnis in Anhang A) mit einem integrierten Analog-Digital-Wandler (ADC) zum Einsatz (siehe 2.4.4).

6.3.1. Entwicklungsumgebung

Für die Entwicklung und das Debugging des Quelltextes sowie die Übersetzung in Maschinencode und dessen Übertragung in den Programmspeicher des Mikroprozessors kam die mit der Hardware gelieferte Entwicklungsumgebung (Silicon Laboratories Integrated Development Environment) zum Einsatz. Als Programmiersprache wurde C gewählt.

Der gesamte Quelltext ist im Anhang C abgedruckt.

6.3.2. Beschreibung der Funktionsweise

Das Hauptprogramm *main(void)* führt zunächst einige interne Initialisierungen aus. Diese umfassen z.B. das Einstellen der Geschwindigkeit und Kommunikationsparameter der seriellen Schnittstelle, die Wahl der Taktquelle des Prozessors, die Konfiguration der Ein- und Ausgabeleitungen sowie die Konfiguration des integrierten Analog-Digital-Wandlers (ADC). Der weitere Programmablauf wird über Unterbrechungsroutinen (englisch: Interrupt) abgewickelt. Dies sind Funktionen, die aufgerufen werden, sobald ein bestimmtes Ereignis auftritt. Ihre Namen enden auf *ISR* (Interrupt Service Routine). [C8051F35]

Die Unterbrechungsroutine *Timer2_ISR* wird nicht aktiv benutzt. Sie wurde nur zu Testzwecken implementiert und im Quelltext belassen. So ist es hier möglich, in regelmäßigen Abständen und somit unabhängig von anderen Abläufen bestimmte Funktionen, wie z.B. die Kommunikation über die serielle Schnittstelle, zu testen.

Die beiden Signalleitungen des Drehgebers lösen die Unterbrechungsroutinen *INT0_ISR* bei jedem Nulldurchgang und *INT1_ISR* bei jedem Schritt aus. Erstere setzt das als automatischer Zähler konfigurierte Register *Timer0* zurück auf Null. Damit beinhaltet dieses immer den aktuellen absoluten Drehwinkel der Probenplattform. Zur optischen Funktionskontrolle wird durch beide Unterbrechungsroutinen jeweils eine der beiden auf der Platine integrierten LEDs ein- bzw. ausgeschaltet.

Die Funktion *ADC0_ISR* wird aufgerufen, sobald der ADC einen Wert digitalisiert hat und startet ihrerseits eine neue Digitalisierung; jedoch durch Neukonfiguration des integrierten Multiplexers auf dem nächsten Kanal. Dies führt zu der in Abbildung 6.1 dargestellten alternierenden Abtastung aller drei Signalkanäle. Bei jedem Schritt-signal des Drehgebers wird der Mittelwert der seit dem letzte Schritt digitalisierten Werte für jeden Kanal sowie der aktuelle Drehwinkel über die serielle Schnittstelle ausgegeben. Dieses Verfahren gewährleistet durch eine optimale Ausnutzung der Zeit zwischen zwei Drehgeberschritten eine gute Mittelung und Gleichzeitigkeit der Sensorsignale und damit eine Reduktion des Rauschpegels. Insbesondere passt sich dieses Verfahren automatisch an die Rotationsgeschwindigkeit an. Bei niedriger Ge-

schwindigkeit steht mehr Zeit pro Schritt zur Verfügung. Dadurch ergeben sich mehr Werte, über die gemittelt werden kann.

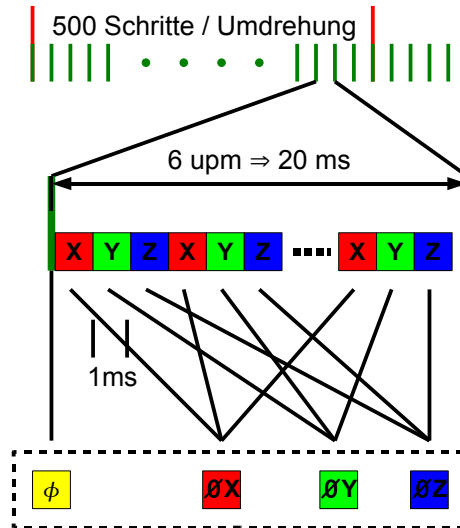


Abbildung 6.1.: Abtastung und Mittelwertbildung der Sensorsignale.

7. Testmessungen und Fehlerabschätzungen

Testmessungen bei unterschiedlichen Bedingungen sind bei der Inbetriebnahme eines neuartigen Messgeräts wichtig, um Störquellen zu lokalisieren und auszuschließen beziehungsweise deren Auswirkung abzuschätzen. Die Ergebnisse der Testmessungen sind im Folgenden dargestellt, dabei wurden auch zunächst unerwartete Störquellen entdeckt.

7.1. Hintergrundfeld

Um die Größenordnung von veränderlichen externen magnetischen Feldern abschätzen zu können, wurden diese am späteren Standort des Geräts zu verschiedenen Tageszeiten gemessen. Dies erfolgte mit einem orthogonalen Fluxgate-Tripel, das später auch zur Streufeldmessung der Proben eingesetzt wurde (siehe 2.4.2). Die Messung erfolgte innerhalb der mit konstantem Strom beschickten Helmholtzspulen, um die konstanten Anteile des Feldes weitestgehend zu kompensieren und nur die Änderungen des Restfeldes aufzuzeichnen. Die Sensoren wurden ungefähr in Ost-West-, Nord-Süd- und z-Richtung orientiert. Zur Umrechnung der Messsignale in Absolutwerte wurden die Herstellerangaben verwendet, dabei entspricht ein Nanotesla einem Signal von 0,14 mV.

Die Ergebnisse einer Messung sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Die größten Schwankungen werden von der direkt an der Theresienstr. 41 vorbeiführenden Strassenbahnlinie hervorgerufen. Als weitere Störquellen kommen vor allem die großen Elektromotoren der Maschinen in der Werkstatt über dem Labor in Betracht. Zwischen zwei und vier Uhr nachts beobachtet man auf allen Komponenten deutlich geringere Amplituden sowie die vereinzelt verkehrenden Straßenbahnen der Nachtlinie. Die mit Abstand größten Amplituden von bis zu 3000 nT treten in der z-Komponente auf. Die Größenordnung der Messungen mit den Fluxgate-Sensoren stimmt gut mit einer wenige Tage später mit einem Papierschreiber aufgezeichneten Messung eines unabhängigen Fluxgate-Sensors überein (pers. Mitteilung, J. Matzka).

Die externen Störfelder liegen somit vier Größenordnungen über den zu messenden Streufeldern (vgl. Abschnitt 3.4) und mindestens eine Größenordnung über den natürlichen Variationen des Erdmagnetfeldes (Pohl, 1997). Somit ist eine wesentliche Reduktion dieser Störungen durch den geplanten Standortwechsel in das magnetische Observatorium in Niederlippach zu erwarten. Da sich die beobachteten Störungen meist langsam innerhalb der für eine Messung benötigten Zeiten (ca. 2 s) verändern, wurde bei der Analyse der Messdaten eine Korrektur für zeitlineare Störungen vorgesehen (vgl. Abschnitt 5.2).

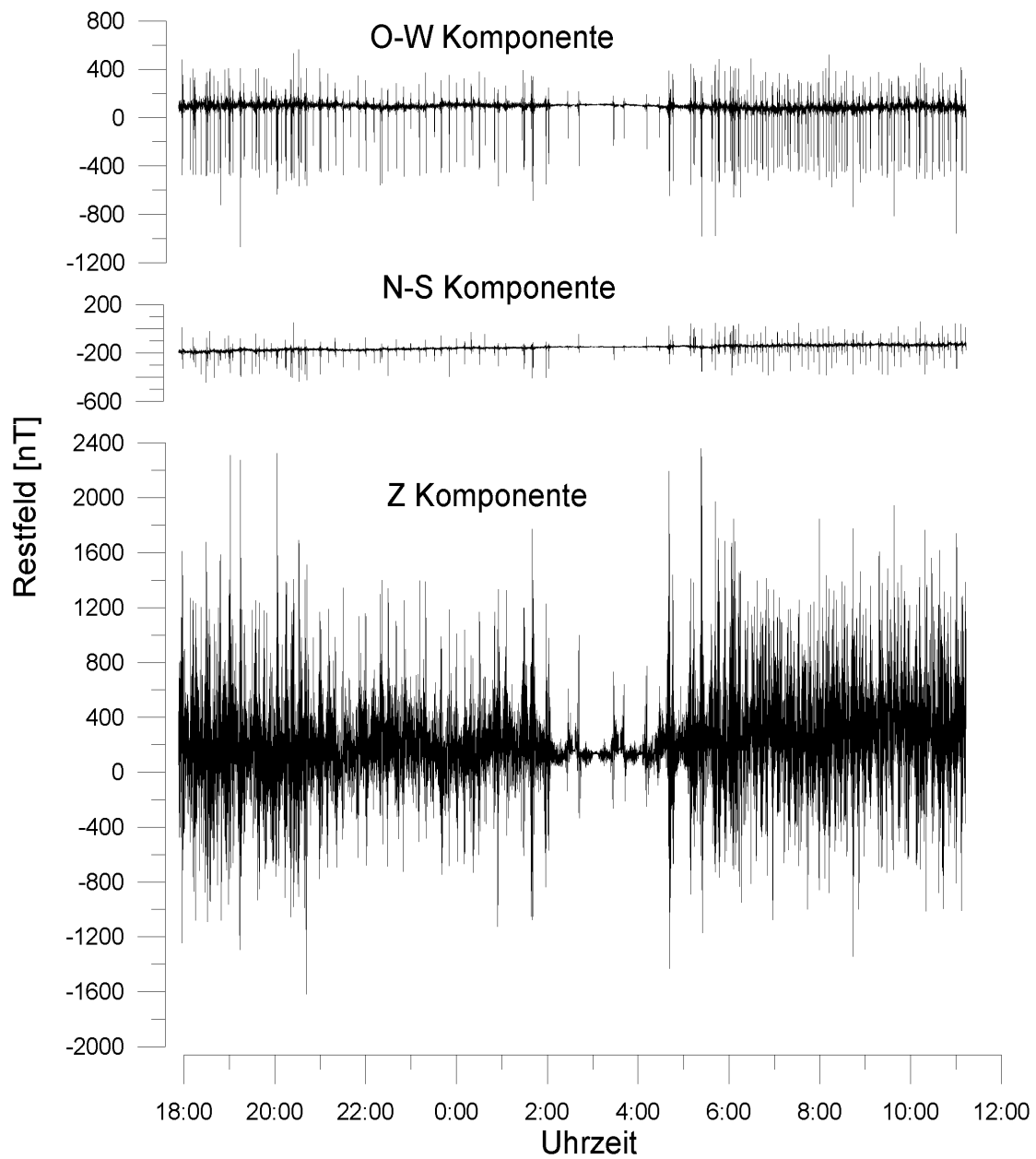


Abbildung 7.1.: Absolutwerte des Restfelds.
Aufgezeichnet vom 2.8.05 17:53 bis 3.8.05 11:13 in Raum K01.

7.2. Einfluss elektrischer Verbraucher auf die Signalqualität

Vor dem Aufbau der neuen Verstärker- und Filterelektronik (siehe Abschnitt 2.4.3) verursachte bereits das Einschalten der Leuchtstoffröhren über dem Instrument ein deutlich sichtbares Rauschen im Signal. Um evtl. vorhandene Störquellen identifizieren zu können, wurden während einer Messung verschiedene elektrische Verbraucher zu- und abgeschaltet. Geprüft wurden so die Deckenbeleuchtung, der Computermonitor, die Heizung und das Gebläse. Es konnte jedoch kein Einfluss auf das Signalrauschen festgestellt werden. Dies überrascht nicht, da alle diese Geräte mit einer Netzfrequenz von 50 Hz betrieben werden, welche durch den eingesetzten Tiefpass mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz herausgefiltert werden.

7.3. Einfluss der Magnetisierung des Temperatursensors

Das verwendete Thermoelement NiCr-Ni (Typ K) weist eine verglichen mit den zu messenden Proben große Magnetisierung auf. Diese ist vermutlich auf die ferromagnetischen Eigenschaften des Nickels zurückzuführen. In diesem Abschnitt soll der Einfluss dieser Magnetisierung auf die Messung einer Probe auf der gegenüberliegenden Seite der Probenplattform untersucht werden. Darüber hinaus soll geklärt werden, ob die bei der Analyse der Messdaten (siehe Kapitel 5) verwendete Korrektur erster Ordnung von Hintergrundfeldern ausreichend ist. Dazu wurden zwei Vergleichsmessungen bei Raumtemperatur durchgeführt.

In Abbildung 7.2 ist die erste Messung ohne Probe, jedoch mit installiertem Temperatursensor zu sehen. Die Daten wurden 500 mal gestapelt, um externe Störungen zu minimieren. Der senkrechte blaue Strich markiert die Lage des Temperatursensors

7. Testmessungen und Fehlerabschätzungen

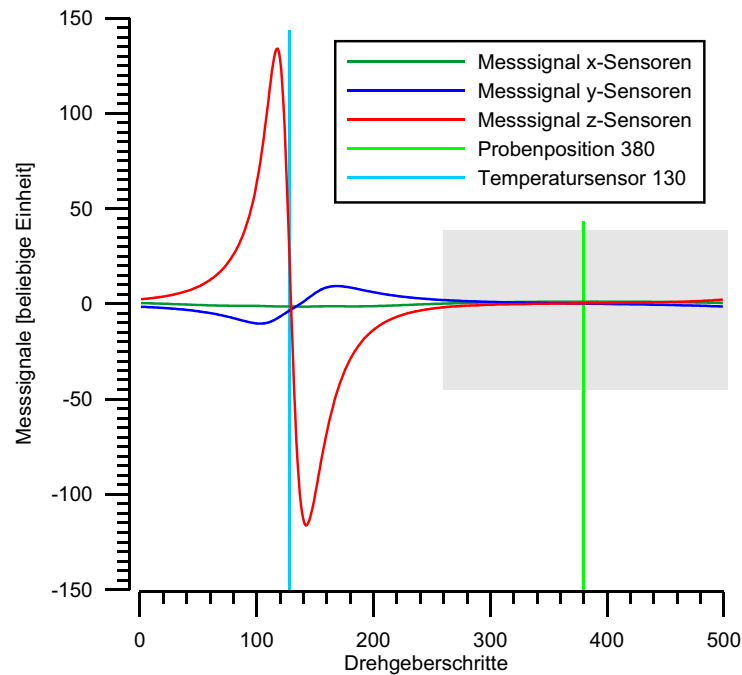


Abbildung 7.2.: Messsignale ohne Probe über einen Winkelbereich von 360° . Die Signalformen resultieren aus der Magnetisierung des Temperatursensors. Der graue Bereich entspricht dem in Abbildung 7.3 dargestellten.

an der Drehgeberposition 130 und der grüne die des Probenhalters auf der gegenüberliegenden Seite an Position 380. Man erkennt, dass die Störungen am stärksten im Gradientensignal der z-Sensoren auftreten. Dies ist nicht verwunderlich, da der Temperatursensor die Form eines dünnen, in z-Richtung orientierten Stabes hat, was zu einer bevorzugten Magnetisierung in dieser Richtung führt.

Die zweite Messung wurde genau wie die erste durchgeführt, jedoch wurde der Probenhalter mit einer Probe (Bezeichnung: 422-9-1, Magnetisierung $7,6 \text{ A/m}$, Inklination $86,8^\circ$, Deklination $71,3^\circ$ mit Spinner im Labor in Niederlippach bestimmt) bestückt. In Abbildung 7.3 sind die Daten beider Messung für einen symmetrischen Winkelbereich von ± 120 Drehgeberschritten um die Probenposition zu sehen. Die Darstellungen wurden aufgrund der stark unterschiedlichen Signalamplituden für

jeden Kanal verschieden skaliert. Für einen Winkelbereich von ± 80 Drehgeberschritten wurden mit der Software Grapher lineare Fits für die Messkurven der ersten Messung (siehe Abbildung 7.2) berechnet. Man sieht, dass das vom Temperatursensor resultierende Untergrundsignal in diesem Fall gut durch eine lineare Korrektur in dem betrachteten Winkelbereich beseitigt werden kann. Zur Auswertung der Daten sollte daher kein größerer Bereich genutzt werden. Eine Subtraktion der ersten von der zweiten Messung zur Beseitigung des Einflusses des Temperatursensors ist bei höheren Temperaturen nicht sinnvoll, da sich dann die Magnetisierung des Temperatursensors verändert.

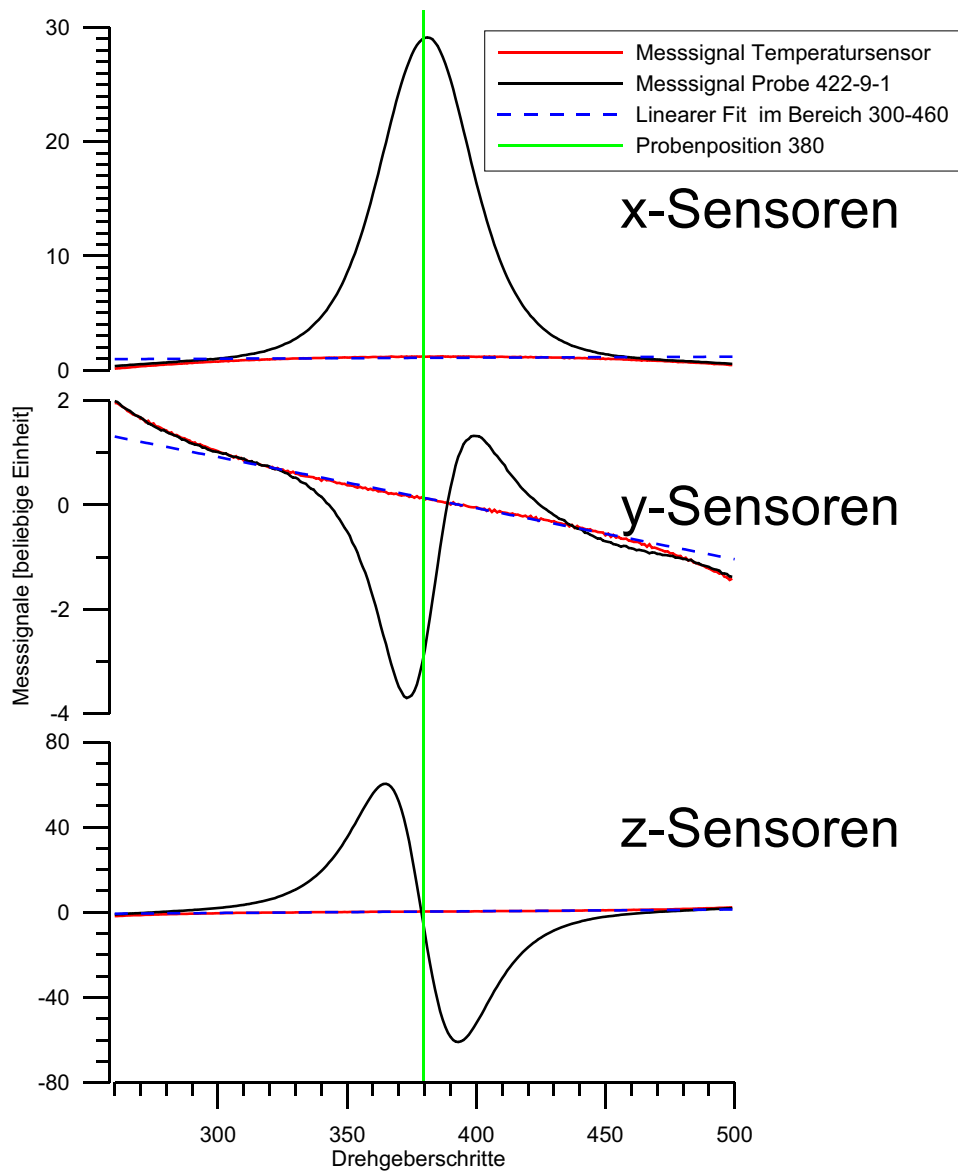


Abbildung 7.3.: Messsignale mit und ohne einer Probe. Gezeigt ist das Untergrundsignal des Temperatursensors (rot) sowie das durch die Probe zusätzlich erzeugte Signal (schwarz). Die blau gestrichelte Linie entspricht den linearen Korrekturen, die bei der Analyse der Messdaten berücksichtigt werden.

7.4. Acht-Lagen-Messung einzelner Proben

Um das Instrument und insbesondere die Auswertung der Daten zu testen, wurden fünf Proben in jeweils acht Lagen (siehe Abbildung 7.4) gemessen.

Bei den Proben handelt es sich um DSDP-Proben, denen IRMs (isothermale remanente Magnetisierung) mit verschiedenen Inklinationen und Deklinationen mit dem Pulsmagnetisierer in einem Feld von 1,1 T im magnetischen Laboratorium in Niederlippach aufgeprägt wurden. Anschließend wurden die Proben mit der AF-Anlage von 2G in allen drei Raumrichtungen mit einem Wechselfeld von 50 mT abmagnetisiert. Dies geschah für jede Probe einzeln, um zu verhindern, dass das Fernfeld einer Probe zur möglichen Aufprägung einer ARM (anhysteretische remanente Magnetisierung) bei einer anderen Probe führt.

In Tabelle 7.1 sind die Proben und die, mit dem Spinner-Magnetometer in Niederlippach gemessenen, Magnetisierungen zusammengestellt. Außerdem sind die Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessungen mit einem Gerät vom Typ MS2 von Bartington (siehe Firmenverzeichnis in Anhang A) aufgeführt.

Probenname	M [A/m]	I [°]	D [°]	Sus [10^{-5}]
54-422-9-1 (38-41)	7,57	86,8	71,3	1956
54-427-9-2 (128-131)	5,80	51,4	357,4	5445
54-427-9-3 (56-59)	6,27	-69,1	262,8	4140
54-427-10-3 (109-112)	7,05	-57,8	49,7	6104
54-428A-4-2 (76-79)	2,73	-5,7	181,0	3159

Tabelle 7.1.: Proben, die für die Testmessungen in acht Lagen benutzt wurden. Angegeben sind der Probenname, die Magnetisierung und ihre Richtung, sowie die Suszeptibilität.

7.4.1. Ablauf der Messungen

Vor jeder Messung wurde das Nullfeld innerhalb der Probenumgebung mit einem zusätzlichen 3-Achsen Fluxgatesensor überprüft. Bei zu großen Restfeldern wurden diese durch das Einstellen der Ströme in den Helmholtzspulen kompensiert. Die Kalibrierung der Verstärkungselektronik wurde durch Anlegen einer kleinen Rechteckspannung in der Größenordnung von 10 mV an allen drei Kanälen gleichzeitig überprüft. Dabei wurden die Verstärkungsfaktoren bei allen Kanälen so gewählt, dass die digitalisierten Werte gleiche Amplituden zeigten und der Messbereich des ADCs von den Sensorsignalen der stärksten Proben gut ausgenutzt wurde. Die Rotationsfrequenz wurde auf 7 upm eingestellt, dies entspricht einer Spannung von 3 V am Antriebsmotor. Diese Einstellungen wurden für alle in dieser Arbeit gezeigten Messungen beibehalten und durch die weiter unten gezeigte Kalibrierung berücksichtigt.

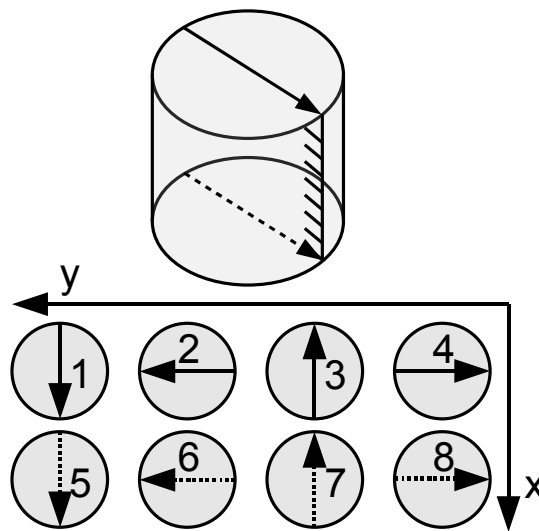


Abbildung 7.4.: Ausrichtung der Proben in acht Lagen für $\phi = 0$.

7.4.2. Magnetisierungsrichtungen

In Abbildung 7.5 sind die Magnetisierungsrichtungen der Messungen der fünf oben genannten DSDP-Proben abgebildet. Für die Analyse der Daten wurden die in Kapitel 4 ermittelten Sensorpositionen verwendet. Diese wurden um 3 mm in x-Richtung und 3 mm in z-Richtung korrigiert, da hier fast immer ein Minimum der Fehler beim Fitten beobachtet werden konnte. Dies ist plausibel, da die Befestigung des Sensorhalters Verschiebungen genau in diesen Richtungen zulässt. Für die Auswertung wurden die Daten von 15 Umdrehungen gestapelt. Man erkennt Unterschiede von wenigen Grad in den Inklinationen sowie den Unterschied im Vorzeichen, der von der Drehung der Proben um ihre x-Achse zwischen den Lagen 4 und 5 resultiert. In den Deklinationen sieht man die 90°-Schritte, um die die Proben zwischen den restlichen Lagen gedreht wurden. Durch die fast senkrechte Inklination der Probe 54-422-9-1 ist die Unsicherheit in den Deklinationen so groß, dass die regelmäßigen 90° Schritte nicht mehr erkennbar sind.

Die gemittelten Ergebnisse aus den 8-Lagen-Messungen sind in Tabelle 7.2 aufgeführt. Dazu wurden die Richtungen um die ausgeführten Drehungen korrigiert und anschließend mit der Software *Palmag* die gemittelte Richtung aus den 8 gemessenen bestimmt. Hierbei wurde der Halbwinkel des Kegels des 95%-Vertrauensniveaus α_{95} sowie der Präzisionsparameter k (Fisher, 1953) bestimmt.

Probenname	M [A/m]	I [°]	D [°]	α_{95}	k
54-422-9-1 (38-41)	7,68	89,5	100,5	2,4	534,9
54-427-9-2 (128-131)	5,66	53,2	353,9	4,0	190,8
54-427-9-3 (56-59)	6,37	-71,8	267,3	2,5	476,3
54-427-10-3 (109-112)	7,07	-58,6	61,2	3,8	210,0
54-428A-4-2 (76-79)	2,41	-9,7	186,0	7,4	56,9

Tabelle 7.2.: Gemittelte Ergebnisse aus den Hotspin-Messungen in 8 Lagen. Angegeben: Probenname, Intensität, Richtung und zwei statistische Parameter.

Abbildung 7.6 zeigt die Streuung der gemessenen Richtungen für jede Probe. Eingezeichnet sind außerdem die mit dem Spinner-Magnetometer bestimmte Richtung sowie die nach der Fisher-Statistik (Fisher, 1953) gemittelte Richtung.

7. Testmessungen und Fehlerabschätzungen

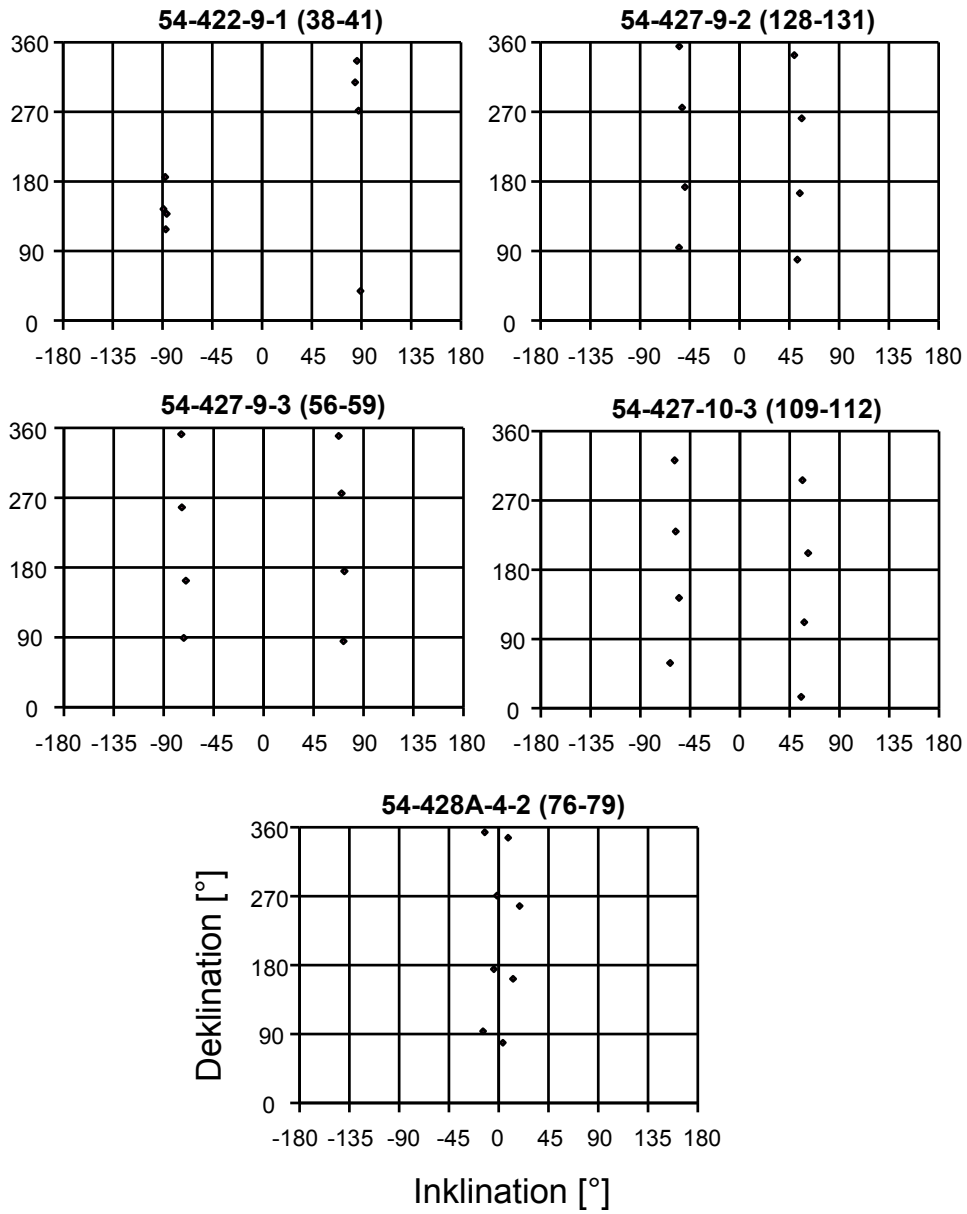


Abbildung 7.5.: Gemessene Magnetisierungsrichtungen in 8 Lagen.
Bei fast senkrechter Inklination (Probe 54-422-9-1) zeigen die Deklinationswerte keine 90°-Schritte mehr.

7. Testmessungen und Fehlerabschätzungen

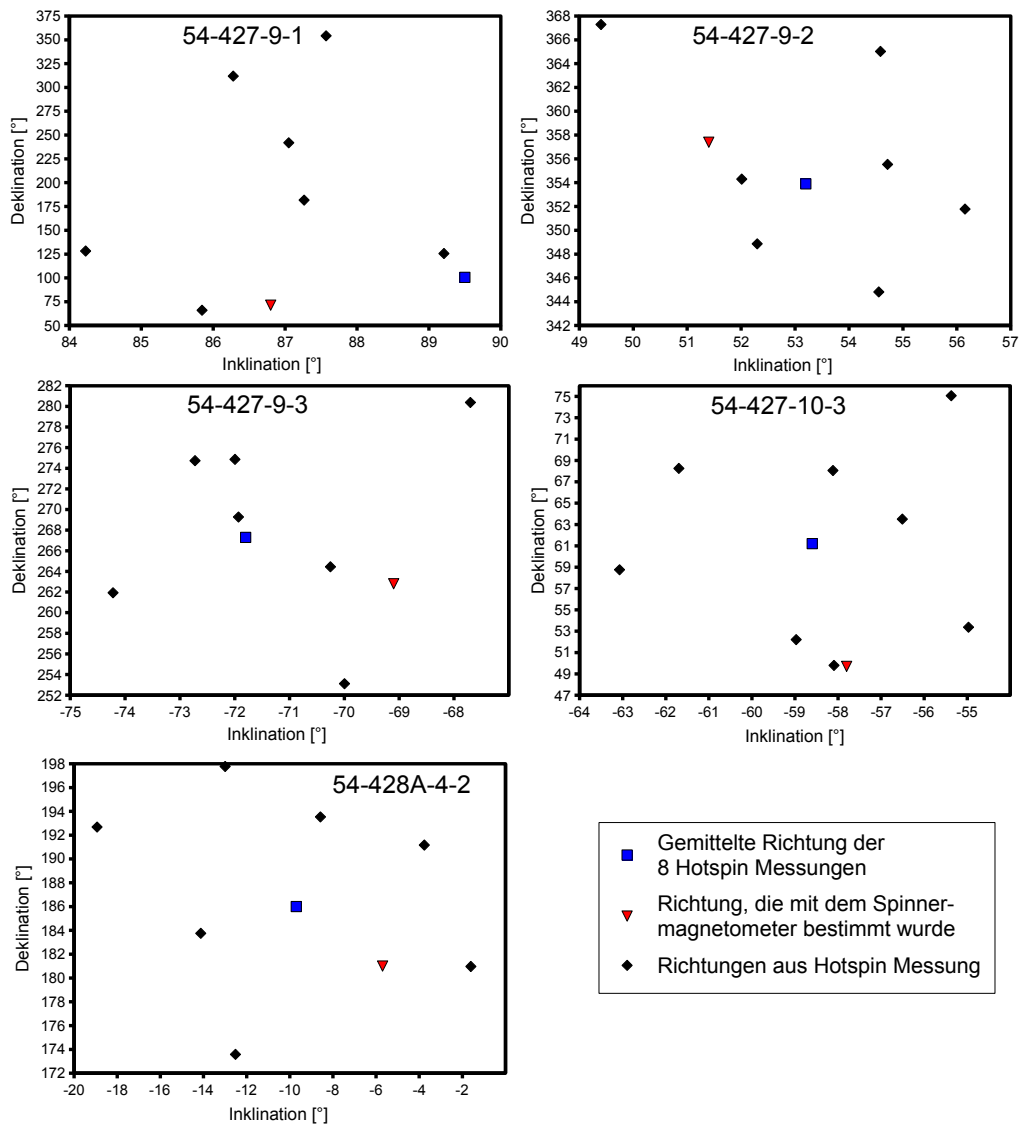


Abbildung 7.6.: Magnetisierungsrichtungen aus den 8-Lagen-Messungen. Dargestellt sind für jede Probe die 8 gemessenen Magnetisierungsrichtungen, deren gemittelte Richtung sowie die mit dem Spinnermagnetometer bestimmte. Deklinationen über 360° wurden nur aus darstellungstechnischen Gründen verwendet. Die zugehörigen Werte entsprechen den um 360° reduzierten.

7.4.3. Kalibrierung

Um Absolutwerte der Magnetisierung bestimmen zu können, muss das Instrument kalibriert werden. Dies geschah anhand der mit dem Spinner-Magnetometer bestimmten Magnetisierungen der fünf Proben (siehe Tabelle 7.1). Dazu wurden die Ergebnisse aus den oben beschriebenen 8-Lagen-Messungen (Mittelwerte in Tabelle 7.2) über den bekannten Magnetisierungen aufgetragen (Abbildung 7.7) und eine Ausgleichsgerade durch den Ursprung berechnet.

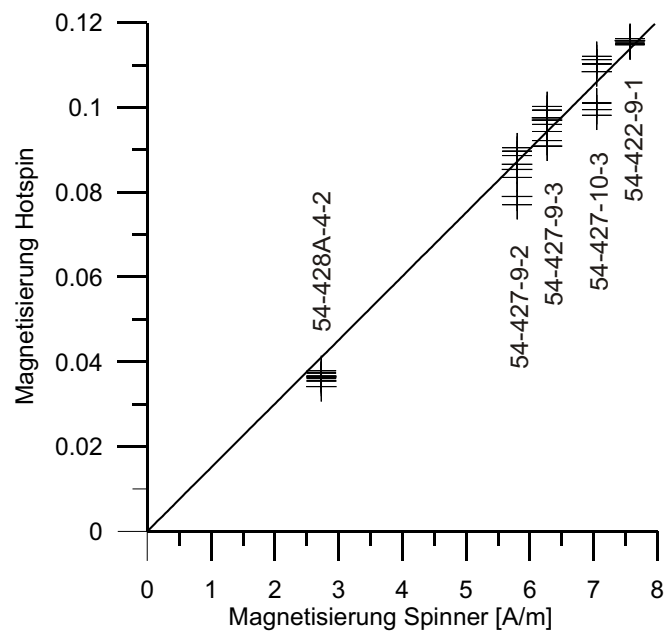


Abbildung 7.7.: Eichmessung.

Mittels einer Ausgleichsgerade durch den Ursprung wurde der Eichfaktor bestimmt. Dieser entspricht dem Kehrwert der Geradensteigung von 66,5 A/m.

Aus der Steigung der Geraden lässt sich der Eichfaktor bestimmen. Dieser kann in der Software zur Datenanalyse (siehe Abschnitt 6.2) eingestellt werden und entspricht

für Inch-Proben sowie den verwendeten Einstellungen der Verstärkungselektronik einem Wert von 66,5 A/m. Dieser wurde für alle weiteren Messungen verwendet.

7.4.4. Fehler

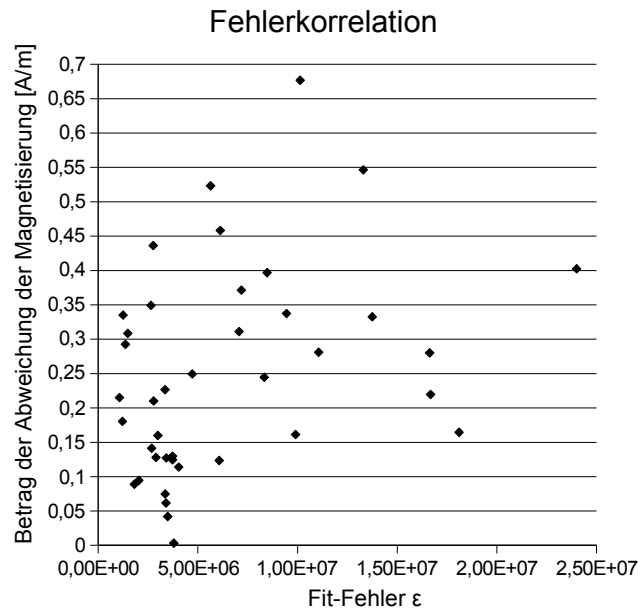


Abbildung 7.8.: Fehlerkorrelation von 5 Proben in 8 Lagen. Aufgetragen ist der Abweichungsbetrag der durch Regressionrechnung bestimmten Magnetisierung von der mit dem Spinnermagnetometer gemessenen über der Summe der quadratischen Abweichungen der Fits ϵ (siehe Abschnitt 5.3).

Die drei mittleren Proben in Abbildung 7.7 zeigen eine deutlich größere Streuung der in 8 Lagen bestimmten Magnetisierungen als die anderen beiden Proben. Eine Erklärung für dieses Verhalten könnte sein, dass sich der angenommene Dipol nicht in der Mitte der Probe befindet. Eine Abhängigkeit von der Magnetisierungsintensität oder der Deklination ist nicht zu erkennen. Es fällt auf, dass nur diese drei Proben mittlere

Inklinationen ($\pm 50^\circ$ bis 70°) besitzen. Um diesen Zusammenhang weiter untersuchen zu können, muss eine größere Anzahl von Proben gemessen werden.

Es wurde versucht eine Korrelation zwischen den Abweichungen der mit dem Spinner-Magnetometer gemessenen Intensitäten von denen mit dem *Hotspin II* gemessenen sowie der Summe der quadratischen Abweichungen ϵ (siehe Abschnitt 5.3) der gefitteten Kurven von den Messwerten zu finden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.8 gezeigt. Man erkennt, dass bei geringen Abweichungen der Magnetisierung auch nur kleine ϵ auftreten. Der umgekehrte Zusammenhang gilt jedoch nur sehr bedingt. Dies bedeutet, dass der Fehler beim Fitten ϵ kein besonders guter Parameter ist, um die Qualität der Messungen zu beurteilen.

7.4.5. Datenbeispiele

Als Extrembeispiele wurden zwei Messungen der Probe 54-427-9-2 ausgewählt. In Abbildung 7.9 sind die Messdaten und die gefitteten Modellkurven dargestellt. Die Messung in Lage 2 zeigt die größte Abweichung von der erwarteten Magnetisierung und entspricht damit dem Datenpunkt, der am weitesten von der Ausgleichsgerade in Abbildung 7.7 entfernt ist. Das Resultat der Messung in Lage 3 stimmt hingegen fast exakt mit dem erwarteten Wert überein. Man erkennt, dass die Fehler ϵ_i bei der stark abweichenden Messung deutlich größer sind.

7. Testmessungen und Fehlerabschätzungen

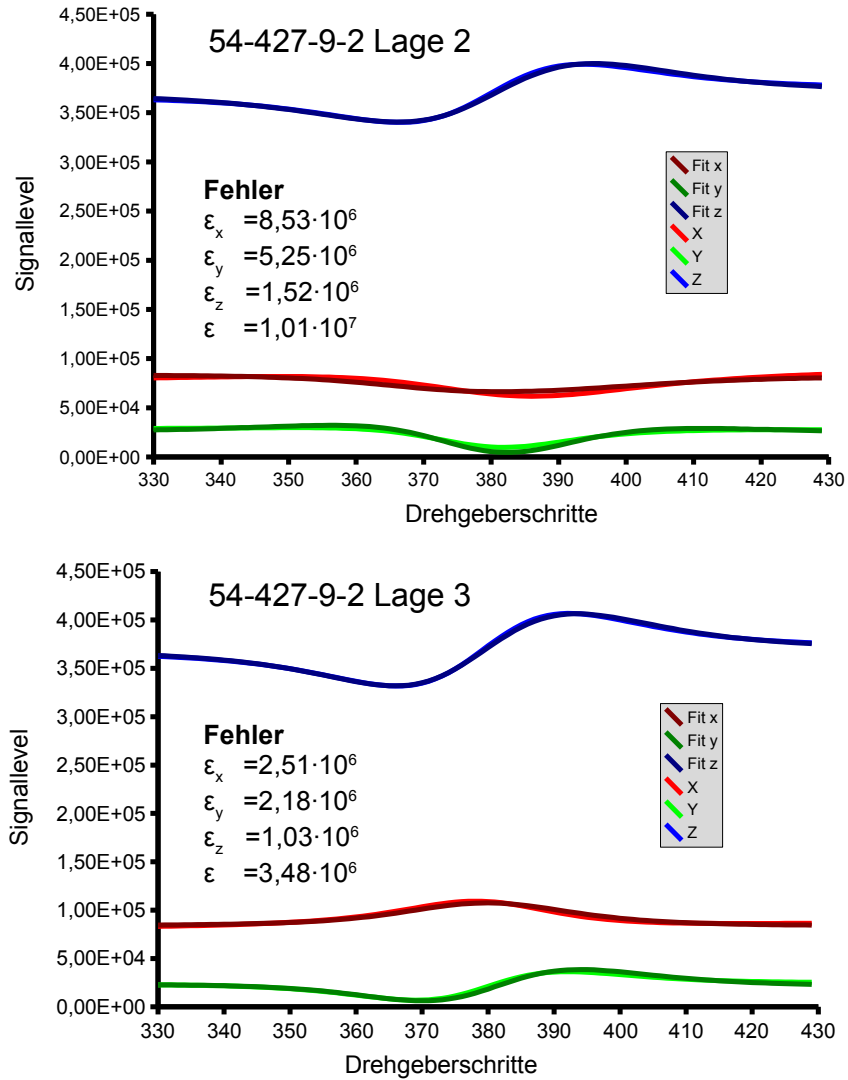


Abbildung 7.9.: Datenbeispiele.

Dargestellt sind zwei Extrembeispiele. Die Daten aus Lage 2 zeigen die größte Abweichung von der erwarteten Magnetisierung, Lage 3 die kleinste.

7.5. Empfindlichkeit

Um die untere Grenze der Empfindlichkeit des Instruments abschätzen zu können, wurde eine vergleichsweise schwache Probe (AGA-9-2) bei Raumtemperatur gemessen. Bei der Auswertung der Daten zeigte sich, dass mindestens eine Stapelung von 200 Datensätzen erforderlich war, um Schwankungen von weniger als 10% in der ermittelten Intensität zu erhalten. Die Auswertung wurde schließlich mit 500 gestapelten Werten durchgeführt und mit einer unmittelbar danach erfolgten Messung mit einem JR4-Spinner-Magnetometer verglichen. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 7.3.

Instrument	D [°]	I [°]	M [mA/m]
JR4-Spinner	266	-78	39
Hotspin-II	217	-62	42

Tabelle 7.3.: Vergleich der Ergebnisse einer schwachen Probe.

Die große Anzahl der erforderlichen Stapelungen sowie die deutlichen Richtungsabweichungen zeigen, dass eine Magnetisierung von 40 mA/m die untere Grenze der Empfindlichkeit darstellt. Dennoch ergeben sich insbesondere für die Intensität der Magnetisierung M sinnvolle Werte mit nur wenigen Prozent Abweichung. Dies zeigt, dass eine Auswertung von Signalen in dieser Größenordnung noch möglich ist. Durch eine Verminderung der externen zeitlich variablen Störungen (geplanter Standortwechsel in das magnetische Observatorium in Niederlippach), sollte sich die Anzahl der benötigten Stapelungen reduzieren.

8. Messung von Ozeanbasalt-Proben

Die bereits bei den Testmessungen verwendeten Proben 54-427-9-2, 54-427-9-3 und 54-428A-4-2 wurden durch thermisches Abmagnetisieren mit dem Hotspin-II-Messgerät genauer untersucht. Die damit gewonnenen Daten wurden mit Messungen an der VFTB verglichen. Die Proben stammen alle aus dem DSDP Leg 54 im Pazifik und sind ca. 2 Millionen Jahre alt (Init. Rep. DSDP, Leg 54).

8.1. Hotspin-II-Messungen

Die Messungen wurden wie in Abschnitt 7.4.1 beschrieben durchgeführt. Die Auswertung erfolgte mit der dafür erstellten Software zur Datenanalyse (siehe Abschnitt 6.2). Die Daten wurden in Gruppen von 25 Datensätzen gestapelt. Damit ist zu erwarten, dass sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis um einen Faktor 5 verbessert. In den Abbildungen 8.1, 8.2 und 8.3 sind die Resultate zusammengestellt. Die Proben 427-9-3 (Abb. 8.2) und 428A-4-2 (Abb. 8.3) zeigen eine monoton fallende Magnetisierungsintensität mit steigender Temperatur. Probe 427-9-2 (Abb. 8.1) zeigt ein reversibles Minimum bei ca. 80 °C und ein Maximum bei 120-140 °C. Um diesen Effekt genauer zu studieren und den Einfluss von induzierten Magnetisierungen abzuschätzen, wurde diese Probe zwei weitere Male bis ca. 170 °C gemessen (Abbildung 8.4). Zwischen den Messungen wurde die Magnetisierungsrichtung durch Drehung der Probe umgekehrt. Dadurch sollte sich eine remanente Magnetisierung ebenfalls umkehren,

eine evtl. vorhandene induzierte Magnetisierung durch Restfelder in der Probenumgebung jedoch nicht. Dies müsste sich im Intensitätsverlauf bemerkbar machen. Da das Verhalten in beiden Orientierungen qualitativ ähnlich ist (Abb. 8.4), ist der Effekt sicher auf das Verhalten der Remanenz der Probe, und nicht etwa auf ein Artefakt der Messung zurückzuführen. Eine wahrscheinliche Erklärung für das thermische Abmagnetisierungsverhalten unterhalb von ca. 140 °C ist eine antiparallele Kopplung zweier magnetischer Phasen mit unterschiedlicher Entblockungstemperatur. Dabei entblockt eine Phase, vermutlich der primäre Titanomagnetit bei ca. 120 - 140 °C. Die zweite Phase würde erst deutlich oberhalb der maximalen Heiztemperatur von 280 °C entblocken (Abb. 8.1).

Dass bei diesen Messungen ein möglicher induzierter Magnetisierungsanteil zu vernachlässigen ist, zeigt ebenfalls eine Abschätzung des Verhältnis von remanenter zu induzierter Magnetisierung M_r/M_i . M_i ergibt sich aus dem Produkt der Suszeptibilität in Tabelle 7.1 und dem externen Feld während der Messung, das mit einem Maximalwert von 1000 nT (0,8 A/m) abgeschätzt wurde. M_r lässt sich direkt aus der Tabelle entnehmen. Für Probe 427-9-2 ergibt sich somit $M_i = 0,04$ A/m sowie $M_r/M_i = 5,8\text{A/m} / 0,04\text{A/m} = 145$. Da die anderen Proben ähnliche Suszeptibilitäten und Remanenzen aufweisen, sind auch hier keine bedeutenden induzierten Anteile der gemessenen Magnetisierung zu erwarten.

Auffällig ist die deutliche Richtungsänderung ab 220 °C bei den Proben 427-9-2 (Abb. 8.1) und 427-9-3 (Abb. 8.2) in der Deklination. Für dieses Verhalten könnten zwei Mechanismen in Frage kommen. Zunächst soll ein magnetomineralogischer Effekt diskutiert werden. Dabei wird angenommen, dass in geringen Mengen das magnetisch sehr harte Mineral Hämatit als Remanenzträger in den jungen Ozeanbasalten vorkommt. Es wird weiter angenommen, dass dessen Beitrag zur Gesamtremanenz aufgrund der sehr viel stärkeren Remanenz der Titanomagnetite vernachlässigbar ist. Dessen Remanenzrichtung (A) könnte bei den Messungen vorangegangenen isothermalen Remanenzzerwerb bei 1 T (Remanenzrichtung B) unbeeinflusst geblieben sein. Bei der darauf folgenden Wechselfeldentmagnetisierung (50 mT) wurde die isothermale Remanenz zum größten Teil wieder abmagnetisiert, so dass die verblei-

bende Remanenz in Richtung B von ähnlicher Größenordnung ist wie die Remanenz in Richtung A. Im Verlaufe des thermischen Abmagnetisierens wäre es dann zu erwarten, dass bei Erreichen der Entblockungstemperatur (hier ca. 240 °C) der Titanomagnetite die Remanenzrichtung A eingenommen wird. Alternativ könnte die Deklinationsänderung durch ein Artefakt aufgrund eines bislang unbekanntes gerätespezifischen Effekts hervorgerufen werden. Dies könnte erklären, dass sowohl bei Probe 427-9-2 (Abb. 8.1) als auch 427-9-3 (Abb. 8.2) eine Änderung im gleichen Temperaturbereich und hauptsächlich bei der Deklination zu beobachten ist. In Abbildung 8.5 sind sowohl die Korrekturwerte a_i und b_i (siehe Abschnitt 5.2) sowie die Fit-Fehler ϵ_i (siehe Abschnitt 5.3) dieser Messung an Probe 427-9-3 dargestellt. Man erkennt, dass die Offset-Korrekturen b_i weitestgehend konstant sind. Die Fit-Fehler ϵ_i sowie die Korrekturterme a_i zeigen im Temperaturbereich der starken Richtungsänderung der Magnetisierung zum Teil große Änderungen. Um endgültig klären zu können, ob die beobachtete Änderung der Magnetisierungsrichtung auf Vorgänge innerhalb der Probe (evtl. bedingt durch die fast vollständige AF-Abmagnetisierung) oder ein apparatives Problem zurückzuführen ist, sind weitere Messungen erforderlich.

8. Messung von Ozeanbasalt-Proben

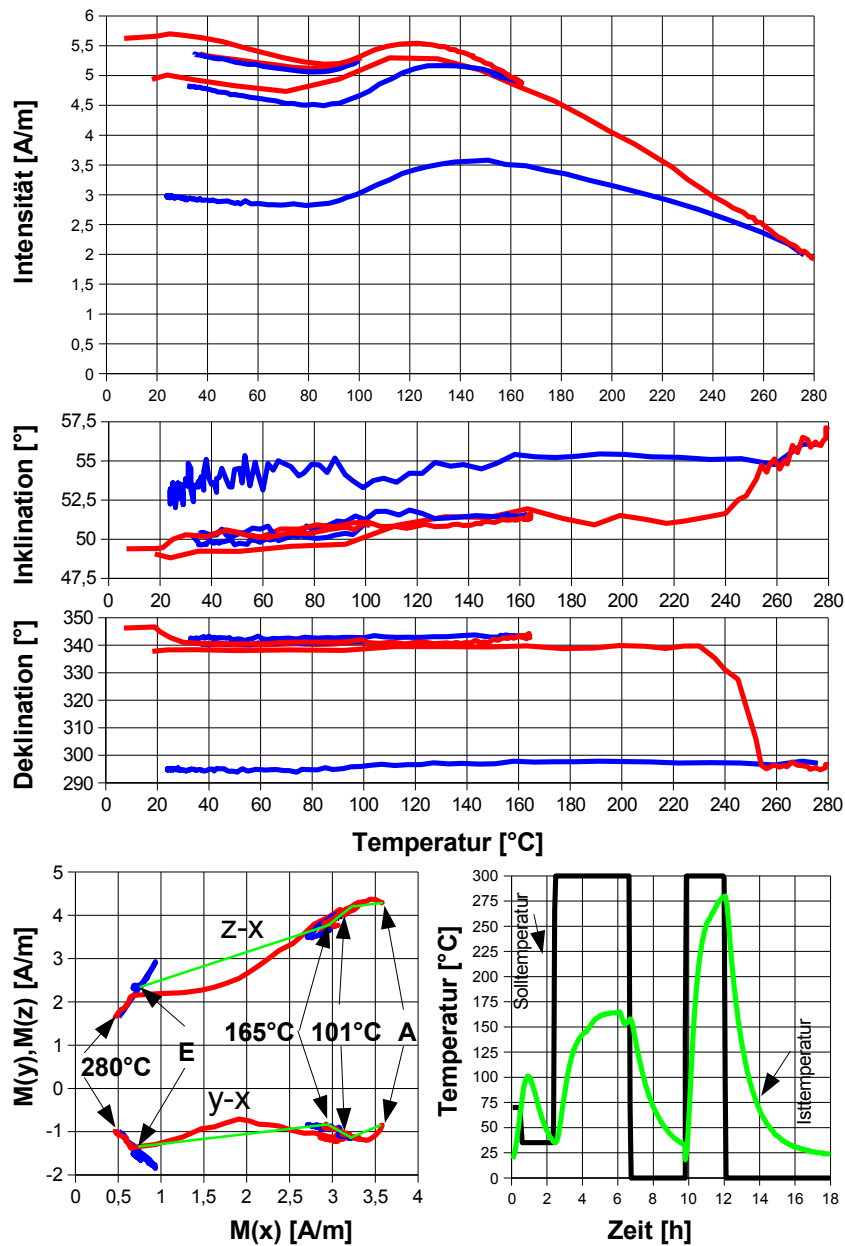


Abbildung 8.1.: Hotpin-II-Ergebnisse von Probe 427-9-2.

Thermisches Entmagnetisierungsverhalten einer zuvor teilweise im Wechselfeld abmagnetisierten Sättigungsremanenz. Blau dargestellt sind die Kühlkurven, rot die Heizkurven. (A)nfang und (E)nde sind markiert. In grün sind die Endpunkte der einzelnen Heizschritte verbunden. Die Daten wurden aus mehreren Messungen zusammengesetzt.

8. Messung von Ozeanbasalt-Proben

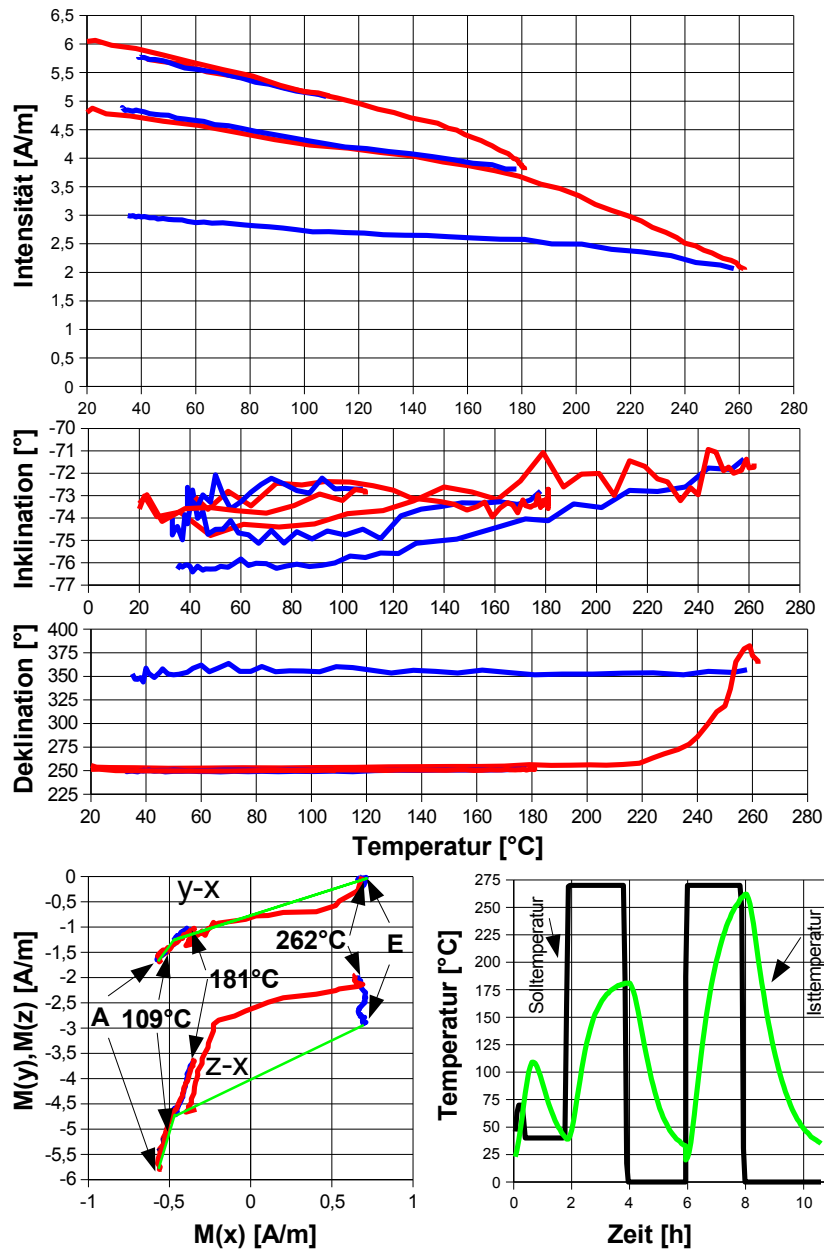


Abbildung 8.2.: Hotspin-II-Ergebnisse von Probe 427-9-3.

Thermisches Entmagnetisierungsverhalten einer zuvor teilweise im Wechselfeld abmagnetisierten Sättigungsremanenz. Blau dargestellt sind die Kühlkurven, rot die Heizkurven. (A)nfang und (E)nde sind markiert. In grün sind die Endpunkte der einzelnen Heizschritte verbunden. Die Daten wurden aus mehreren Messungen zusammengesetzt.

8. Messung von Ozeanbasalt-Proben

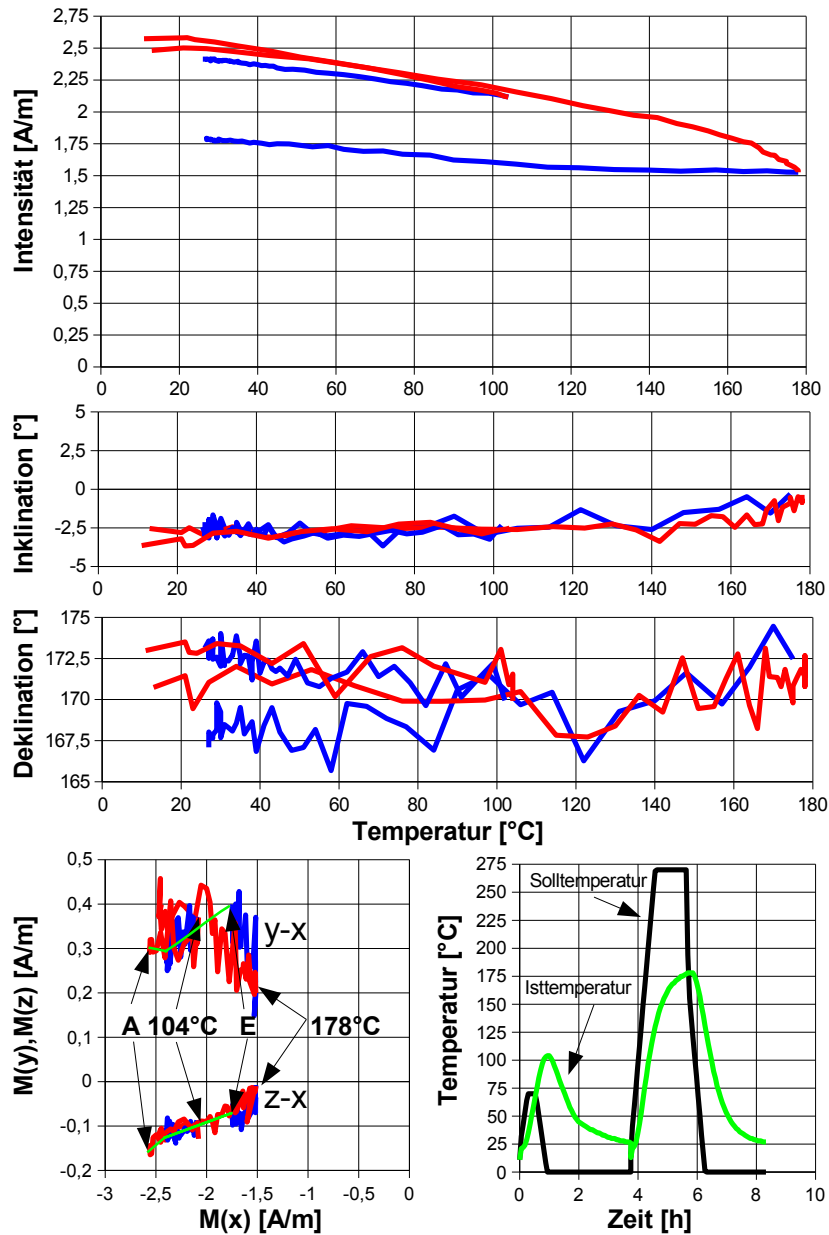


Abbildung 8.3.: Hotspin-II-Ergebnisse von Probe 428A-4-2.

Thermisches Entmagnetisierungsverhalten einer zuvor teilweise im Wechselfeld abmagnetisierten Sättigungsremanenz. Blau dargestellt sind die Kühlkurven, rot die Heizkurven. (A)nfang und (E)nde sind markiert. In grün sind die Endpunkte der einzelnen Heizschritte verbunden. Die Daten wurden aus mehreren Messungen zusammengesetzt.

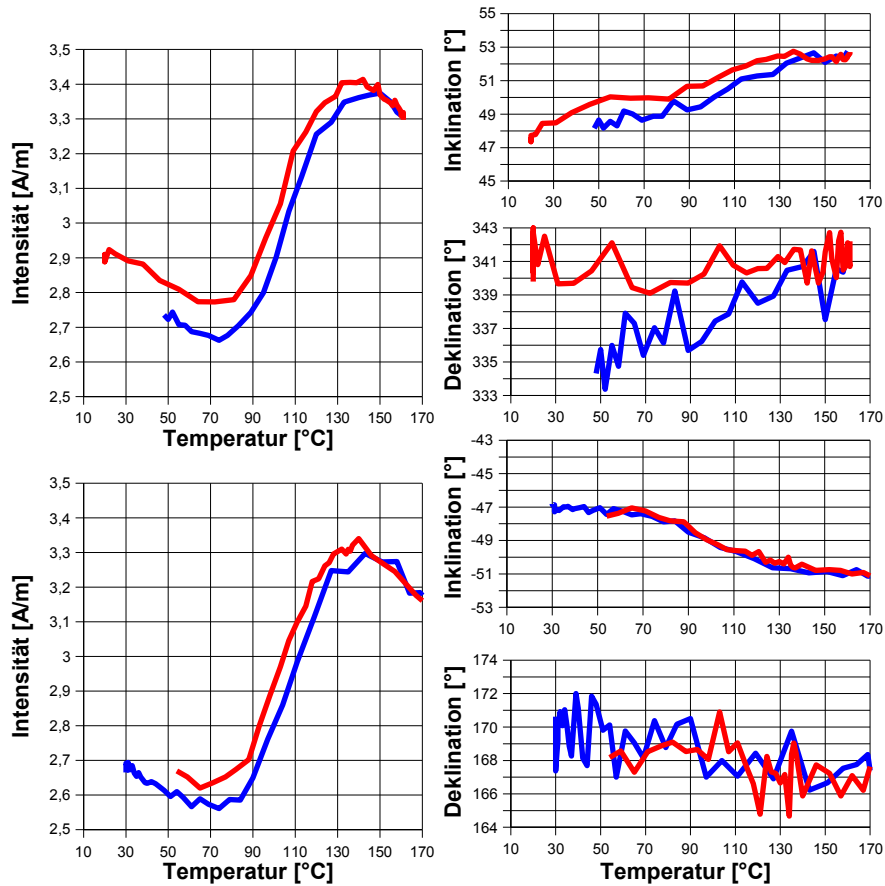


Abbildung 8.4.: Hotpin-II Ergebnisse von Probe 427-9-2.

Thermisches Entmagnetisierungsverhalten der zuvor thermisch behandelten Probe (Abb. 8.1). Blau dargestellt sind die Kühlkurven, rot die Heizkurven. Gezeigt sind zwei direkt aufeinander folgende Messungen bis 170°C. Zwischen den Messungen wurde die Probe derart gedreht, dass der Magnetisierungsvektor in die entgegengesetzte Richtung zeigte.

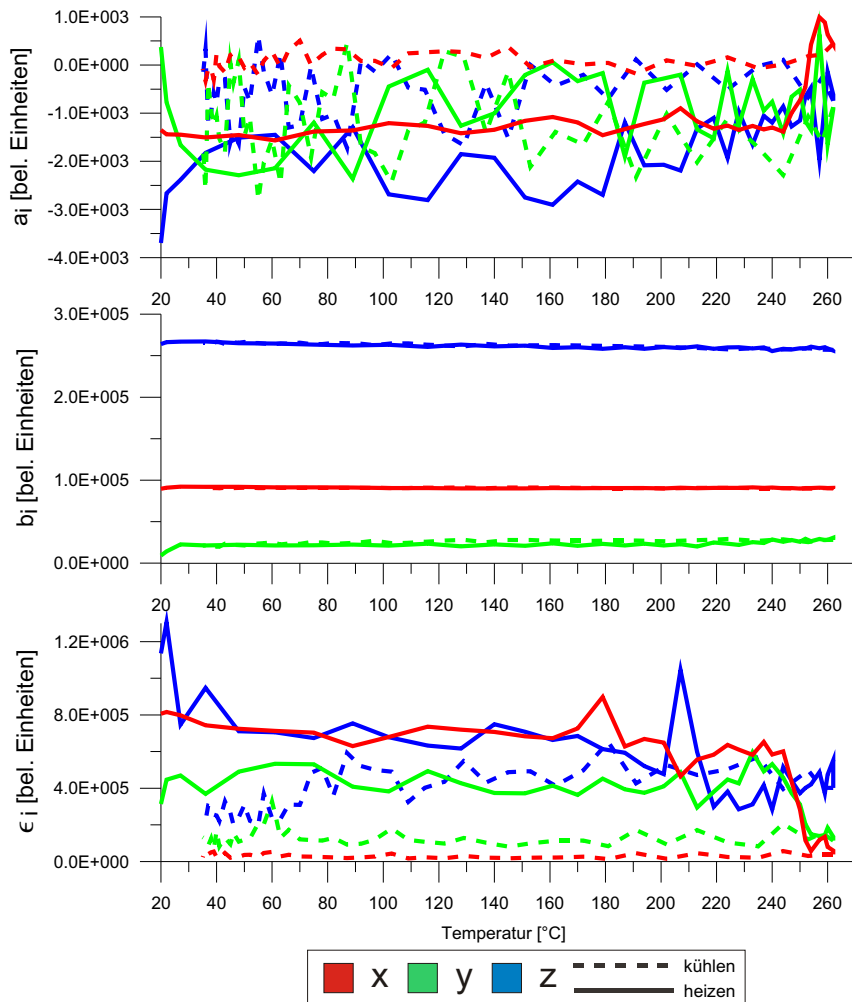


Abbildung 8.5.: Hotspin-II-Ergebnisse von Probe 427-9-3. Dargestellt sind die Korrekturwerte a_i , b_i sowie die Fehlerwerte ϵ_i über der Temperatur. Es sind die Daten des Heizschritts bis 262 °C gezeigt.

8.2. VFTB-Messungen

Für die VFTB-Messungen wurden aus den zur Verfügung stehenden Inch-Proben kleine Kerne mit 3 mm Durchmesser und ca. 5 mm Länge gebohrt. Die thermomagnetischen Kurven wurden in einem Magnetfeld von 0,68 T durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 8.6, 8.7 und 8.8 dargestellt. Zusätzlich sind dort die Entmagnetisierungskurven der Hotspin-II-Messungen zum Vergleich dargestellt. Zur besseren Übersicht wurde jeweils die Messung mit der höchsten Endtemperatur ausgewählt.

Tabelle 8.1 zeigt die aus den VFTB-Messungen gewonnenen Parameter. Hier fällt auf, dass die Koerzitivkraft B_c der Probe 427-9-2, die bei der thermischen Entmagnetisierung mit dem Hotspin-II-Gerät ein Minimum und ein Maximum in der Magnetisierungsintensität zeigte, am geringsten ist.

An einem weiteren Probestück von 427-9-2 wurden zusätzlich thermomagnetische Kurven mit geringen Hintergrundfeldern aufgezeichnet. Dabei zeigte sich bei dem kleinstmöglichen Feld (< 1 mT) qualitativ ein ähnlicher Verlauf der Magnetisierungsintensität wie bei den Hotspin-II-Messungen. Bei einem Feld von 4 mT war hingegen kein Minimum oder Maximum mehr zu erkennen. Diese Feldstärke könnte nach Haag et al. (1990) genügen, um die Austauschwechselwirkung zwischen zwei magnetischen Phasen zu überdecken.

Probenname	Gewicht [mg]	T_c [°C]	B_{cr} [mT]	M_{rs} [Am^2/kg]	M_s [Am^2/kg]	B_c [mT]	M_{rs}/M_s	B_{cr}/B_c	Gestalt σ_{Hys}
54-427-9-2 (128-131)	127	180	11,94	0,11	1,17	4,09	0,09	2,92	-0,28
54-427-9-3 (56-59)	249	240, 480	10,19	0,14	1,17	6,22	0,12	1,64	-0,05
54-428A-4-2 (76-79)	241	260, 470	13,52	0,08	0,72	5,64	0,11	2,40	-0,45

Tabelle 8.1.: Ergebnisse der Untersuchungen mit der VFTB.

Der Hystereseparameter σ_{Hys} entspricht dem von Fabian (2003) beschriebenen.

8. Messung von Ozeanbasalt-Proben

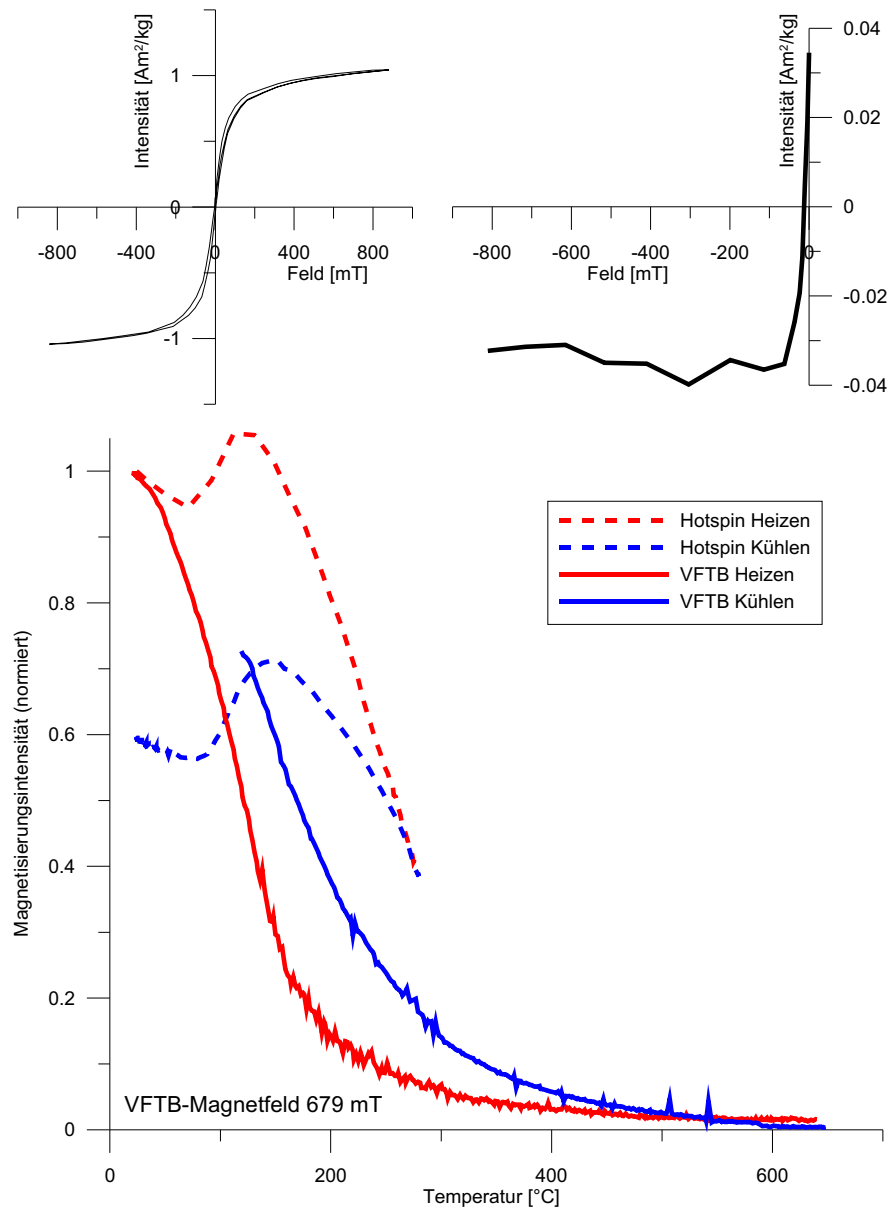


Abbildung 8.6.: VFTB-Ergebnisse von Probe 427-9-2. Blau dargestellt sind die Kühlkurven, rot die Heizkurven.

8. Messung von Ozeanbasalt-Proben

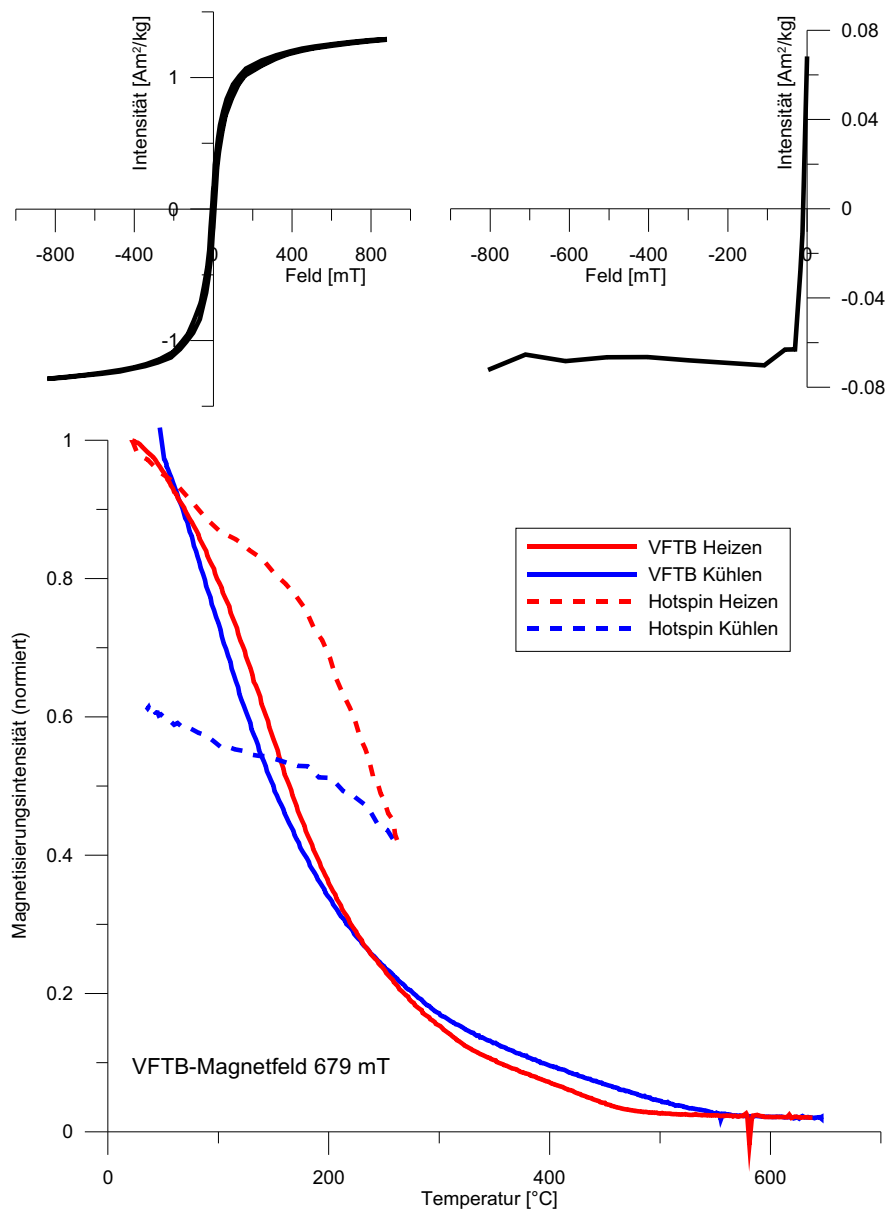


Abbildung 8.7.: VFTB-Ergebnisse von Probe 427-9-3. Blau dargestellt sind die Kühlkurven, rot die Heizkurven.

8. Messung von Ozeanbasalt-Proben

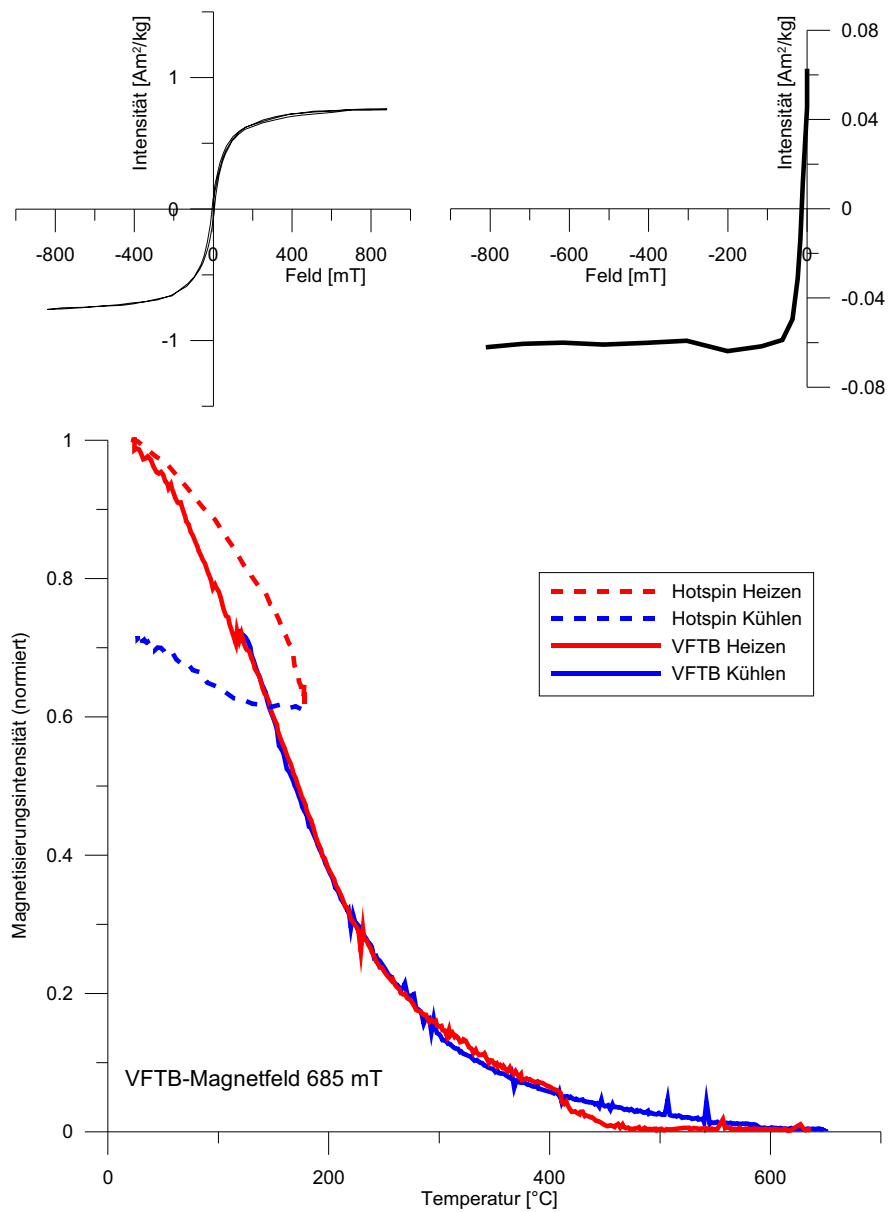


Abbildung 8.8.: VFTB-Ergebnisse von Probe 428A-4-2. Blau dargestellt sind die Kühlkurven, rot die Heizkurven.

9. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Konzeption sowie der Aufbau eines Messgeräts zur Bestimmung der remanenten Magnetisierung von Gesteinsproben beschrieben. Die Besonderheit des Instruments liegt in der Möglichkeit, die Messungen kontinuierlich während des Aufheizens oder Abkühlens der Proben zwischen Raumtemperatur und 330 °C durchzuführen. Dabei werden alle drei Komponenten der Remanenz simultan erfasst. Dies erlaubt insbesondere die Beobachtung von Richtungs- und Intensitätsänderungen der NRM. Der gewählte Magnetometer-Aufbau sowie die weitgehende Automatisierung des Messvorgangs ermöglicht die Erweiterung auf andere Anwendungsgebiete, z.B. die Bestimmung von Paläointensitäten.

Es wurde gezeigt, dass sich das vorgestellte Instrument zur Untersuchung von Ozeanbasalten eignet. Dazu wurden bereits vorhandene, eine Sättigungsremanenz tragende Ozeanbasalt-Proben mit einem Wechselfeld soweit abmagnetisiert, bis ihre Remanenz-Intensität in etwa der einer natürlichen remanenten Magnetisierung entsprach (ca. 5 A/m bei Ozeanbasalten). Bei den Messungen trat bei einer Probe ein interessantes Entmagnetisierungsverhalten auf, das möglicherweise auf die reversible Kopplung zweier magnetischer Phasen zurückzuführen ist. Diese Probe wurde genaueren gesteinsmagnetischen Untersuchungen unterzogen, die die vermutete Kopplung magnetischer Phasen bestätigte.

Probleme bereitete das Erreichen von Temperaturen über 300°C. Dies ist auf das unkonventionelle Konzept der Heißluftheizung zurückzuführen, das gewählt wurde, um magnetische Störungen innerhalb des Probenraums möglichst gering zu halten. Die für das Instrument erstellte Software erlaubt die Vorgabe von beliebigen Temperaturschritten und Heizraten, so dass sich auch längere Messreihen weitestgehend

automatisiert durchführen lassen.

Die Messungen wurden durch technische Störungen wie die Straßenbahnlinie oder die elektrischen Maschinen der in der Nähe befindlichen Werkstatt beeinflusst. Diese Effekte konnten durch den Einsatz von elektronischen Filterschaltungen sowie die Stapelung der Daten weitestgehend kompensiert werden. Durch diese Maßnahmen konnte die Empfindlichkeit auf ca. 40 mA/m gesteigert werden.

Es ist zu erwarten, dass die Messgenauigkeit des Instruments in einer magnetisch ruhigeren Umgebung weiter steigen wird. Aus diesem Grund ist als neuer Standort das Labor für Gesteins- und Paläomagnetismus in Niederlippach vorgesehen. Da die Erbohrung von Ozeanbasalten vergleichsweise schwierig und teuer ist und deshalb nur wenige solcher Proben zur Verfügung stehen, soll erst nach der Verlegung des Messgeräts nach Niederlippach die natürliche remanente Magnetisierung weiterer Ozeanbasalte gemessen werden. Von diesen Messungen sind Aussagen über die Trägerminerale der NRM zu erwarten, und damit ein Beitrag zur Klärung der Frage nach der Altersabhängigkeit der Amplitude der ozeanischen Magnetfeldanomalien.

10. Danksagung

Herrn Prof. Peter Bunge, dem Institutsleiter, danke ich für die Bereitstellung meines Arbeitsplatzes.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Jürgen Matzka für die freundschaftliche und umfassende Betreuung während der gesamten Arbeit sowie Herrn Prof. Dr. Valerian Bachtadse für seine Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. Nikolai Petersen danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit sowie die Durchsicht des Manuskripts.

Bei meinem Kommilitonen Josef Weber möchte ich mich für das angenehme Arbeitsklima in unserem Zimmer sowie die interessante Geländearbeit auf Zypern bedanken.

Für verschiedene interessante Anregungen und Vorschläge bin ich Herrn Prof. Dr. Friedrich Heller zu Dank verpflichtet.

Herrn Dr. Karl Fabian danke ich für sein Interesse an dem Messgerät und seinen Hinweis auf die Regressionsanalyse der Daten.

10. Danksagung

Herrn Dr. Roman Leonhardt sowie allen anderen Mitarbeitern des Instituts danke ich für die freundliche Atmosphäre sowie die Möglichkeit jederzeit um Rat zu fragen.

Meinem Kommilitonen Christoph Moder danke ich für verschiedene interessante Diskussionen sowie die Hilfe bei einigen Problemen mit \LaTeX .

Besonders bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Werkstatt, insbesondere bei Herrn Josef Habel und Herrn Anton Mayer, ohne die der mechanische Aufbau des Instruments nicht zu schaffen gewesen wäre. Außerdem danke ich Herrn Martin Feller, Herrn Alex Hornung sowie Herrn Hartwig Spitzfaden für die Unterstützung bei verschiedenen technischen Problemen.

Außerdem möchte ich mich bei Manuela Weiß für die Hilfe bei den Messungen in Niederlippach bedanken.

Bei Herrn Prof. Dr. Heinrich Soffel möchte ich mich bedanken, dass er durch seine interessanten Vorlesungen mein Interesse an der Geophysik geweckt hat.

Ganz besonders danke ich meiner Freundin Kerstin Reimer für ihre Geduld und Unterstützung.

Bei meinen Eltern möchte ich mich für die Unterstützung bedanken, die mir mein Studium ermöglicht hat.

A. Firmenverzeichnis und Bezugsquellen

- Bürklin OHG
Schillerstraße 41
D-80336 München
<http://www.buerklin.de>
- Conrad Electronic GmbH
Klaus-Conrad-Str. 1
92240 Hirschau
<http://www.conrad.de>
- MIR ELEKTRONIK VERTRIEBS GMBH
Landwehrstraße 28
80336 München
<http://www.mir-elektronik.de>
- RS Components GmbH
Hessenring 13b
64546 Mörfelden-Walldorf
<http://www.rsonline.de>
- SAHLBERG GmbH & Co. KG
Friedrich-Schüle-Str. 20

85622 Feldkirchen
<http://www.sahlberg.biz>

- Bartington Instruments Ltd
10 Thorney Leys Business Park
Witney, Oxford, OX28 4GG England
<http://www.bartington.com>
- OMRON ELECTRONICS LLC
One Commerce Drive
Schaumburg, IL 60173
<http://www.omron.com>
- LEISTER Process Technologies
Riedstrasse
CH-6060 Sarnen/Schweiz
<http://www.leister.com>
- Silicon Laboratories GmbH
Luitgardstrasse 14-18
75177 Pforzheim
<http://www.silabs.com>
- Frenzelit-Werke GmbH & Co. KG
Frankenhammer
95460 Bad Berneck
<http://www.frenzelit.de>
- Greiner und Gassner GmbH
Dachauer Str. 233
80637 München
<http://www.ggm-glastechnik.de>

A. Firmenverzeichnis und Bezugsquellen

- Eurotherm Deutschland GmbH
Ottostraße 1
65549 Limburg an der Lahn
<http://www.eurotherm.de>

B. Matlab Routinen

Listing B.1: hotspin_I

```
1 function I = hotspin_I( sx, sy, sz, phi)
2 % returns the matrix I for given sensor position
3
4 % define the radius
5 R = 0.15;
6
7 % vector from sensor to specimen
8 r = [sx-R*cos(phi), sy-R*sin(phi), sz];
9
10 % distance between specimen and sensor
11 abs_r = norm( r);
12
13 A = zeros( 3, 3);
14 % first row
15 A(1,1) = 2*r(1)^2-r(2)^2-r(3)^2;
16 A(1,2) = 3*r(1)*r(2);
17 A(1,3) = 3*r(1)*r(3);
18 % second row
19 A(2,1) = A(1,2);
20 A(2,2) = 2*r(2)^2-r(1)^2-r(3)^2;
21 A(2,3) = 3*r(2)*r(3);
22 % third row
23 A(3,1) = A(1,3);
24 A(3,2) = A(2,3);
25 A(3,3) = 2*r(3)^2-r(2)^2-r(1)^2;
26
```

B. Matlab Routinen

```
27 B = [cos(phi) sin(phi) 0; sin(phi) cos(phi) 0; 0 0 1];
28 I = A*B/abs_r^5*(1e-7/4/pi);
```

Listing B.2: hotspin_I_amplitudes

```
1 function Amps = hotspin_I_amplitudes( sx, sy, sz, sensor_direction)
2 % creates sensor sensitivity curves during specimen rotation at the
   specified sensor location:
3 % * sx, sy, sz: position of sensor
4 % * sensor_direction: 1=sensor x-direction, 2=sensor y-direction, 3=sensor
   z-direction
5
6 % get Y values
7 A = hotspin_I_vs_phi( sx, sy, sz, -250, 250, sensor_direction);
8
9 % calc amplitudes
10 Amps = max( A) - min( A);
```

Listing B.3: hotspin_I_vs_phi

```
1 function A = hotspin_I_vs_phi( sx, sy, sz, step1, step2, sensor_direction)
2 % calculate components of I during specimen rotation at the specified
   sensor location and direction:
3 % * step1, step2 angle range
4 % * sx, sy, sz: position of sensor
5 % * sensor_direction: 1=sensor x-direction, 2=sensor y-direction, 3=sensor
   z-direction
6
7 % clear A
8 A=[];
9
10 % get X values
11 X = step1:step2;
12
13 % calc Y values for each step
14 for phi=X
15     I = hotspin_I( sx, sy, sz, hotspin_step2rad( phi));
16     A=[A;I(sensor_direction,:)];
```

B. Matlab Routinen

17 end

Listing B.4: hotspin_plot_amp

```
1 function A = hotspin_plot_amp( x,y,z, sensor_direction)
2 % plot amplitudes along x or z axis
3 % sensor_direction: 1=sensor x-driection, 2=sensor y-direction, 3=sensor z
  -direction
4 % exaple call: hotspin_plot_amp( 0.20, 0, -0.05:0.001:0.05, 3);
5
6 % set color order to R G B
7 set(0,'DefaultAxesColorOrder',[1 0 0;.3 .7 0;0 0 1], '
  DefaultAxesLineStyleOrder','-|--|:')
8
9 % clear A
10 A=[];
11
12 % if x is not size one, plot along x axis. else polt along z axis
13 [a,b] = size( x);
14 if( b > 1)
15     % calc amps for each step along x axis
16     for c=x
17         amps = hotspin_I_amplitudes( c, y, z, sensor_direction);
18         A=[A;amps];
19     end
20     plot( x, A);
21     xlabel( 'x [m]');
22     title( ['Sensorrichtung: ', sensor_direction+119, '; y=', num2str( y),
  '; z=', num2str(z)]);
23 else
24     % calc amps for each step along z axis
25     for c=z
26         amps = hotspin_I_amplitudes( x, y, c, sensor_direction);
27         A=[A;amps];
28     end
29     plot( z, A);
30     title( ['Sensorrichtung: ', sensor_direction+119, '; x=', num2str( x),
```

B. Matlab Routinen

```
        ' ; y=' , num2str(y));  
31 xlabel( 'z [m]');  
32 end  
33 % axis([-Inf,+Inf,0,1.8E-4])  
34 ylabel( 'I_{ij} Amplitude [Vs/Am^4]');  
35 legend( ['x: I_{' num2str( sensor_direction) '1}'], ['y: I_{' num2str(  
        sensor_direction) '2}'], ['z: I_{' num2str( sensor_direction) '3}']];
```

Listing B.5: hotspin_plot_I

```
1 function A = hotspin_plot_I( sx, sy, sz, step1, step2, sensor_direction)  
2 % creates sensor sensitivity curves during specimen rotation at the  
   % specified sensor location:  
3 % * step1, step2 angle range  
4 % * sx, sy, sz: position of sensor  
5 % * sensor_direction: 1=sensor x-driection, 2=sensor y-direction, 3=sensor  
   % z-direction  
6 % example call: hotspin_plot_I( .15, 0, -.045, -100, +100, 1);  
7  
8  
9 % get X values  
10 X = step1:step2;  
11  
12 % get Y values  
13 A = hotspin_I_vs_phi( sx, sy, sz, step1, step2, sensor_direction);  
14  
15 % plot X vs A  
16 plot(X, A);  
17  
18 % make everything nice  
19 % set color order to R G B  
20 set(0,'DefaultAxesColorOrder',[1 0 0;.3 .7 0;0 0 1], '  
   % DefaultAxesLineStyleOrder','-|--|:');  
21 legend( ['x: I_{' num2str( sensor_direction) '1}'], ['y: I_{' num2str(  
   % sensor_direction) '2}'], ['z: I_{' num2str( sensor_direction) '3}']];  
22 xlabel( '\phi [Drehgeberschritte]');  
23 ylabel( 'I_{ij} [Vs/Am^4]');
```

B. Matlab Routinen

```
24 title( ['Sensorrichtung: ', sensor_direction+119, '; s_x=', num2str( sx),  
        ' ; s_y=', num2str( sy), ' ; s_z=', num2str( sz)]);  
25 % axis([-Inf,Inf,-1.00E-4,1.80E-4]);
```

Listing B.6: hotspin_step2rad

```
1 function [rad] = hotspin_step2rad( step)  
2 % converts encoder steps (0-500) into radians (0-2pi)  
3  
4 rad = step/500*2*pi;
```

C. Quelltext Mikroprozessor

Listing C.1: Mikroprozessor Quelltext in C

```
1 //-----
2 // hotspin.c
3 //-----
4 // (c) Michael Wack 2005, 2006
5 //
6 //
7 // firmware for the hotspin 2
8 // gets sensor values over ADC and position information from encoder
9 // output over RS232,115200,8N1
10 //
11 //
12 // Target: C8051F35x
13 //
14 // Tool chain: KEIL Eval 'c'
15 //
16
17 //-----
18 // Includes
19 //-----
20 #include <c8051f350.h> // SFR declarations
21
22 #include <string.h>
23 #include <stdio.h>
24
25 //-----
26 // 16-bit SFR Definitions for 'F35x
```

C. Quelltext Mikroprozessor

```
27 //-----
28
29 sfr16 TMR2RL   = 0xca;           // Timer2 reload value
30 sfr16 TMR2     = 0xcc;           // Timer2 counter
31
32 int x;
33
34 char send_buffer[35];
35 char send_buffer_len;
36 char send_pos;
37
38 //-----
39 // Global CONSTANTS
40 //-----
41 // number of channels to be measured
42 #define NUM_CHANNELS 3
43
44 // defines pre-gain of ADC: gain = 2^ADC_GAIN (1-7)
45 // use decimal numbers!
46 #define ADC_GAIN 0
47
48 // defines how many samples give one ADC value (10bits)
49 // minimum 20
50 #define ADC_DECIMATION_RATIO_L 0x20
51 #define ADC_DECIMATION_RATIO_H 0x00
52
53
54 // defines the channels to be measured
55 // 0-7 = AINx, F = Temp, 8-E = AGND
56 char channels[ NUM_CHANNELS ] = { 0x03, 0x14, 0x25 };
57
58 // holds the stacked data of each channel
59 signed long channel_data[ NUM_CHANNELS ];
60
61 // holds how many samples exist
62 unsigned int samples;
63
```

C. Quelltext Mikroprozessor

```
64 // current channel
65 unsigned char channel;
66
67
68 // step interrupt?
69 char bStepInt;
70
71 #define SYSCLK          24500000 / 8          // SYSCLK frequency in Hz
72
73
74 sbit LED1 = P0^7;          // LED='1' means ON
75 sbit LED2 = P0^6;
76 sbit SW2 = P1^0;          // SW2='0' means switch pressed
77
78 //-----
79 // Function PROTOTYPES
80 //-----
81 void SYSCLK_Init (void);
82 void PORT_Init (void);
83 void UART0_Init (void);
84 void Timer0_Init (void);
85 void Timer2_Init (int counts);
86 void ADC0_Init (void);
87
88 void Timer2_ISR (void);
89 void INTO_ISR (void);
90 void INT1_ISR (void);
91 void UART0_ISR( void);
92 void ADC0_ISR( void);
93
94 void send_rs232( char* buffer, char buffer_len);
95 void send_next_byte();
96 void ADC_measure( char ch);
97
98 signed long ADCValue_2_signed_long( ADCH, ADCM, ADCL);
99
100 //-----
```


C. Quelltext Mikroprozessor

```
101 // MAIN Routine
102 //-----
103 void main (void) {
104
105     // disable watchdog timer
106     PCA0MD &= ~0x40;           // WDTE = 0 (clear watchdog timer
107                               // enable)
108
109     SYSCLK_Init ();           // Initialize system clock
110     PORT_Init ();            // Initialize crossbar and GPIO
111
112     Timer0_Init ();          // Init Timer0 to count
113                               // encoder pulses
114     Timer2_Init (SYSCLK / 12 / 2); // Init Timer2 to generate
115                               // interrupts at a 10Hz rate.
116     UART0_Init ();           // Init UART0
117     ADC0_Init ();            // Init ADC0
118
119     EA = 1;                  // enable global interrupts
120
121     x = 0;
122
123     while (1)                // spin forever
124     {
125     }
126 }
127
128 //-----
129 // SYSCLK_Init
130 //-----
131 //
132 // This routine initializes the system clock to use the internal
133 // 24.5MHz / 8 oscillator as its clock source.
134 // It also enables the missing clock detector reset.
135 //
136 void SYSCLK_Init (void)
137 {
```

C. Quelltext Mikroprozessor

```
138 OSCICN = 0x83;           // configure internal oscillator for
139                               // its highest frequency
140 RSTSRC = 0x04;           // enable missing clock detector
141 }
142
143 //-----
144 // PORT_Init
145 //-----
146 //
147 // Configure the Crossbar and GPIO ports and UART0.
148 // P3.3 - LED (push-pull)
149 //
150 void PORT_Init (void)
151 {
152     POSKIP    = 0x0B;
153     XBR0      = 0x01;
154     XBR1      = 0x50;
155
156
157     P0MDOUT |= 0xD0;       // enable LEDs and TX as a push-pull output
158
159     IT0ICF    = 0x23;       // INT0 triggered by P0.3,
160                               // INT1 triggered by P0.2, active low
161     IT0       = 1;         // INT0 is edge triggered
162     IT1       = 1;         // INT1 is edge triggered
163     EX0       = 1;         // Enable external INT0 interrupts
164     EX1       = 1;         // Enable external INT1 interrupts
165 }
166
167
168 //-----
169 // UART0_Init
170 //-----
171 //
172 // Configure the UART using Timer1, for <baudrate> and 8-N-1.
173 //
174 void UART0_Init (void)
```

C. Quelltext Mikroprozessor

```
175 {
176     SCON0    = 0x00;        // configure UART, 8bit
177
178     REN0     = 1;          // UART receive enabled
179
180     TMOD     |= 0x20;      // Timer 1 Mode 2
181     CKCON    |= 0x08;      // Timer 1 uses SYSCLK
182
183     TH1      = 0x96;      // reload value 96h-->115200 baud; 0xCB=230400
184     TL1      = 0xff;      // reload immediately
185     TR1      = 1;         // Timer 1 enabled
186
187     ES0      = 1;         // UART interrupt enabled
188 }
189
190 //-----
191 // Timer0_Init
192 //-----
193 //
194 // Configure the Timer0, for counting encoder pulses
195 //
196
197 void Timer0_Init (void)
198 {
199     TMOD     |= 0x05;      // Timer0 is counter, Mode 1
200
201     TL0      = 0xFF;      // make position invalid
202     TH0      = 0xFF;
203 }
204
205 //-----
206 // Timer2_Init
207 //-----
208 //
209 // Configure Timer2 to 16-bit auto-reload and generate an interrupt at
210 // interval specified by <counts> using SYSCLK/48 as its time base.
211 //
```

C. Quelltext Mikroprozessor

```
212 void Timer2_Init (int counts)
213 {
214     TMR2CN = 0x00;           // Stop Timer2; Clear TF2;
215                               // use SYSCLK/12 as timebase
216     CKCON  &= ~0x60;       // Timer2 clocked based on T2XCLK;
217
218     TMR2RL = -counts;      // Init reload values
219     TMR2   = 0xffff;       // set to reload immediately
220     ET2    = 1;           // enable Timer2 interrupts
221     TR2    = 1;           // start Timer2
222 }
223
224
225
226 //-----
227 // ADC0_Init
228 //-----
229 //
230 //
231 //
232 void ADC0_Init (void)
233 {
234
235     // enable ADC interrupt
236     EIE1 = 0x08;
237
238     //enable ADC0
239     ADC0MD |= 0x80;
240
241     // set gain (3bit)
242     ADC0CN |= ADC_GAIN;
243
244     // set Modulator Clock Divisor - 1
245     ADC0CLK = 0x00;
246
247     // set ADC0 Decimation Ratio (samples / output word) 11bit
248     ADC0DECL = ADC_DECIMATION_RATIO_L;
```

C. Quelltext Mikroprozessor

```
249     ADCODECH = ADC_DECIMATION_RATIO_H;
250
251     // set ADC0 buffers
252     //  ADC0BUF = 0x55; // select low buffers
253     //  ADC0BUF = 0xAA; // select high buffers
254
255     // do a full internal calibration
256     ADC0MD |= 0x01;
257
258     samples = 0;
259     channel = 0;
260     ADC_measure( channel);
261 }
262
263
264 //-----
265 // Interrupt Service Routines
266 //-----
267
268 //-----
269 // Timer2_ISR
270 //-----
271 // This routine is executed whenever Timer2 overflows.
272 //
273 void Timer2_ISR (void) interrupt 5
274 {
275     TF2H = 0;                // clear Timer2 interrupt flag
276 }
277
278
279
280 //-----
281 // INTO_ISR
282 //-----
283 // external interrupt 0 --> zero position
284 //
285
```

C. Quelltext Mikroprozessor

```
286 void INTO_ISR (void) interrupt 0
287 {
288     LED2 = ~LED2;
289
290     TLO  = 0x00; // reset Timer 0 --> position 0
291     TH0  = 0x00;
292
293     if( !TR0)
294     {
295         TR0    = 1; // Start counter the first time, if not already done
296     }
297 }
298
299 //-----
300 // INT1_ISR
301 //-----
302 // external interrupt 1 --> encoder step
303 //
304
305 void INT1_ISR (void) interrupt 2
306 {
307     LED1 = ~LED1;
308
309     bStepInt = 1;
310 }
311
312
313
314 //-----
315 // UARRT0_ISR
316 //-----
317 // Send and receive interrupts
318 //
319
320 void UART0_ISR (void) interrupt 4
321 {
322     // Send complete
```

```
323     if( TIO != 0)
324     {
325         TIO = 0;
326
327         send_next_byte();
328     }
329
330     // Receive complete
331     if( RIO != 0)
332     {
333         RIO = 0;
334     }
335 }
336
337 //-----
338 // ADC0_ISR
339 //-----
340 // ADC end of conversion interrupts
341 //
342
343 void ADC0_ISR (void) interrupt 10
344 {
345     union {
346         unsigned char bytes[2];
347         unsigned int unsigned_int;
348     } convert;
349
350
351     channel_data[ channel] += ADCValue_2_signed_long( ADC0H, ADC0M, ADC0L)
352         ;
353
354     if( ++channel >= NUM_CHANNELS)
355     {
356         // we completed another sample of all channels
357         samples++;
358
359         // lets start again with the first channel
```

```
359     channel = 0;
360     if( bStepInt)
361     {
362         unsigned char pos, x;
363
364         // reset step interrupt
365         bStepInt = 0;
366
367         // output position
368         convert.bytes[0] = TH0; convert.bytes[1] = TL0;
369         pos = sprintf( send_buffer, "%u", convert.unsigned_int);
370
371         // output values
372         for( x = 0; x < NUM_CHANNELS; x++)
373         {
374             pos += sprintf( send_buffer+pos, "\t%d", (signed long)((
375                 channel_data[x] / samples) >> ADC_GAIN));
376
377             // reset data
378             channel_data[ x] = 0;
379         }
380
381         // reset data
382         samples = 0;
383
384         // line feed
385         sprintf( send_buffer+pos, "\r");
386
387         // send over rs232
388         send_buffer_len = strlen( send_buffer);
389         send_rs232( NULL, 0);
390     }
391 }
392
393 // do next measurement
394 ADC_measure( channel);
```



```
395
396 // clear int flag
397 ADOINT = 0;
398 }
399
400
401 //-----
402 // send_rs232
403 //-----
404 // prepares buffer to send over rs232
405 //
406
407
408 void send_rs232( char* buffer, char buffer_len)
409 {
410     if( buffer) {
411         memcpy( send_buffer, buffer, buffer_len);
412         send_buffer_len = buffer_len;
413     }
414     send_pos = 0;
415     send_next_byte();
416 }
417
418 //-----
419 // send_next_byte
420 //-----
421 // send the next byte of send_buffer
422 //
423
424 void send_next_byte( void)
425 {
426     if( send_pos < send_buffer_len)
427     {
428         SBUF0 = send_buffer[ send_pos++];
429     }
430 }
431
```

```
432
433 //-----
434 // ADC_measure
435 //-----
436 // select channel and do a measurement
437 //
438
439 void ADC_measure( char ch)
440 {
441     // wait until ADC ready
442     while( ADOBUSY || ADCBSY);
443
444     // ready ?
445     if( !ADOBUSY && !ADOCBSY)
446     {
447         // select channel
448         ADCOMUX = channels[ ch];
449
450         //do next single conversion
451         ADC0MD |= 0x02;
452     }
453 }
454
455
456 //-----
457 // ADCValue_2_signed_long
458 //-----
459 // convert Value from ADC to a signed long
460 //
461
462 signed long ADCValue_2_signed_long( ADCH, ADCM, ADCL)
463 {
464     union {
465         unsigned char bytes[4]; // or a nested struct of 4 byte fields
466         signed long long_int;
467     } convert;
468
```

C. Quelltext Mikroprozessor

```
469 convert.bytes[0] = ADCH;  
470 convert.bytes[1] = ADCM;  
471 convert.bytes[2] = ADCL;  
472 convert.bytes[3] = 0; // gets shifted out  
473  
474 return convert.long_int >> 8;  
475 }
```

D. LabView Diagramme

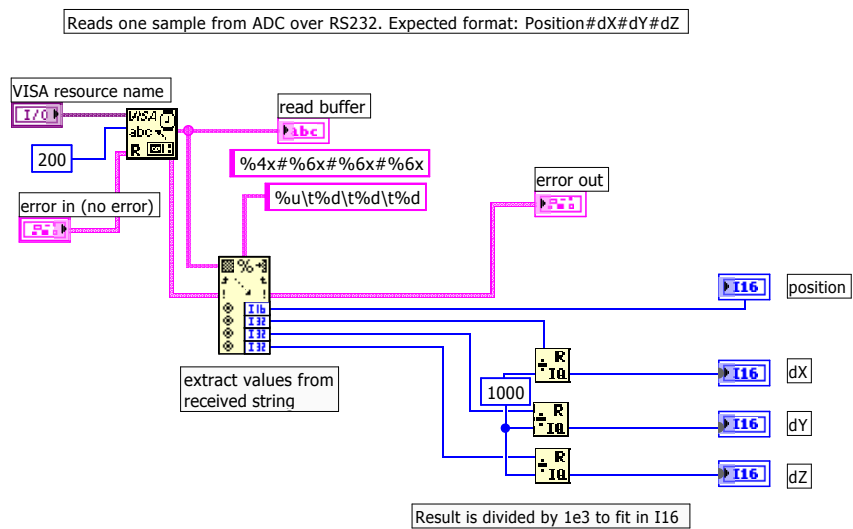


Abbildung D.1.: ADC_Read_Sample.vi

Der bei jedem Drehgeberschritt gesendete String mit den Messdaten und der Position wird eingelesen und die einzelnen Werte ertrahiert.

D. LabView Diagramme

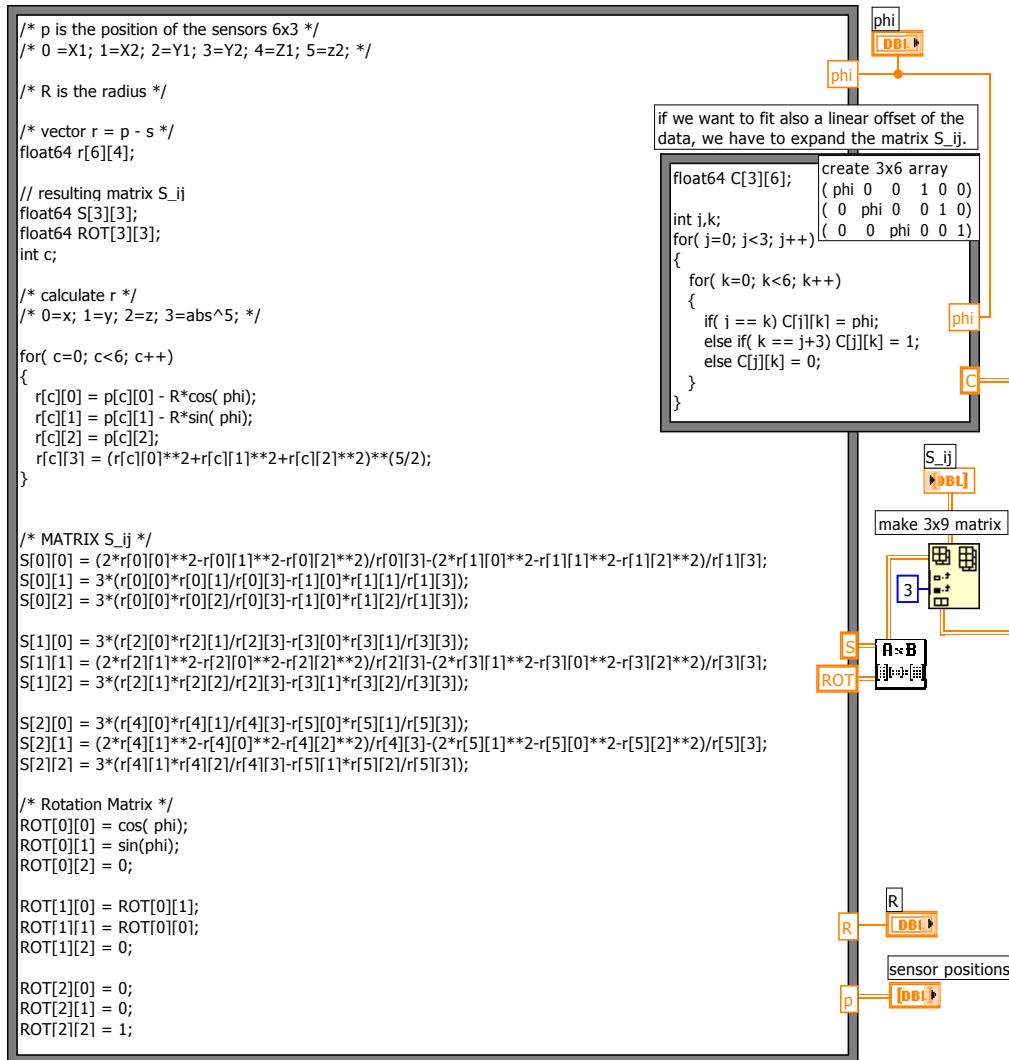


Abbildung D.2.: S_{ij} .vi
Berechnung der Matrix S_{ij} , die für die Regressionsanalyse benötigt wird.

D. LabView Diagramme

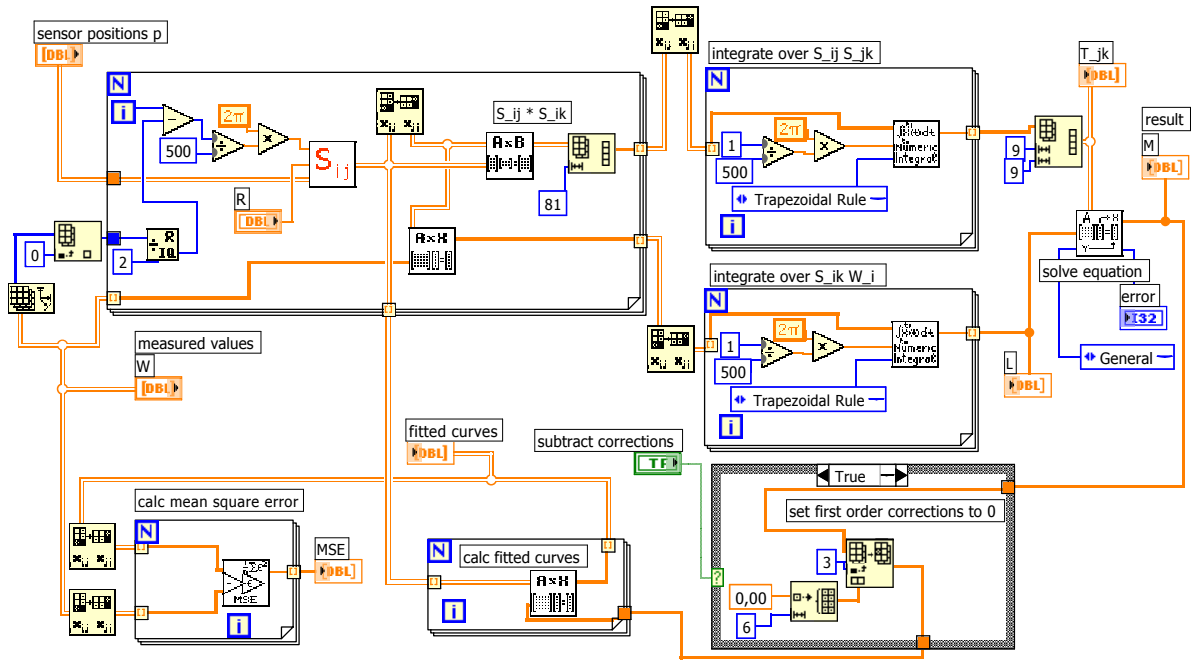


Abbildung D.3.: Fit_M.vi

Durchführung der numerischen Regressionsanalyse der Messdaten um den Ergebnisvektor \vec{m} zu erhalten.

D. LabView Diagramme

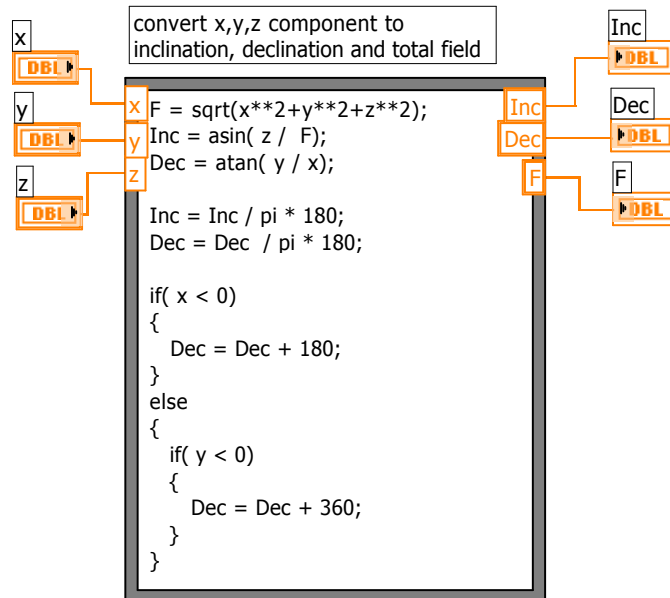


Abbildung D.4.: xyz2IDF.vi

Umrechnung der x,y und z Komponente der Magnetisierung in die entsprechenden Werte der Inklination, Deklination sowie den Magnetisierungsbetrag.

E. Schaltpläne

E.1. Signalverstärkung und Filterung

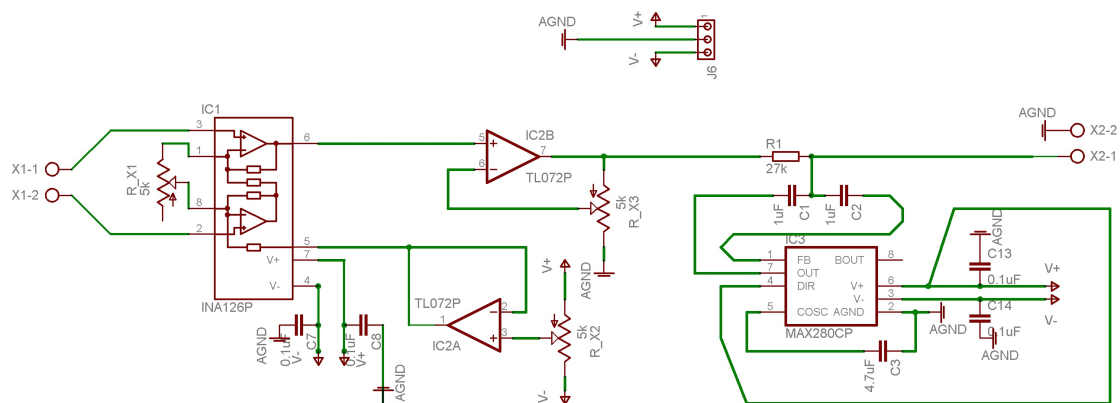


Abbildung E.1.: Schaltplan der Filter- und Verstärkerelektronik.

Die Schaltung erlaubt die Einstellung der Verstärkung sowie die Korrektur des Offsets. Die Grenzfrequenz des Tiefpasses liegt bei 10Hz. Für jeden der drei Kanäle kommt eine solche Schaltung zum Einsatz.

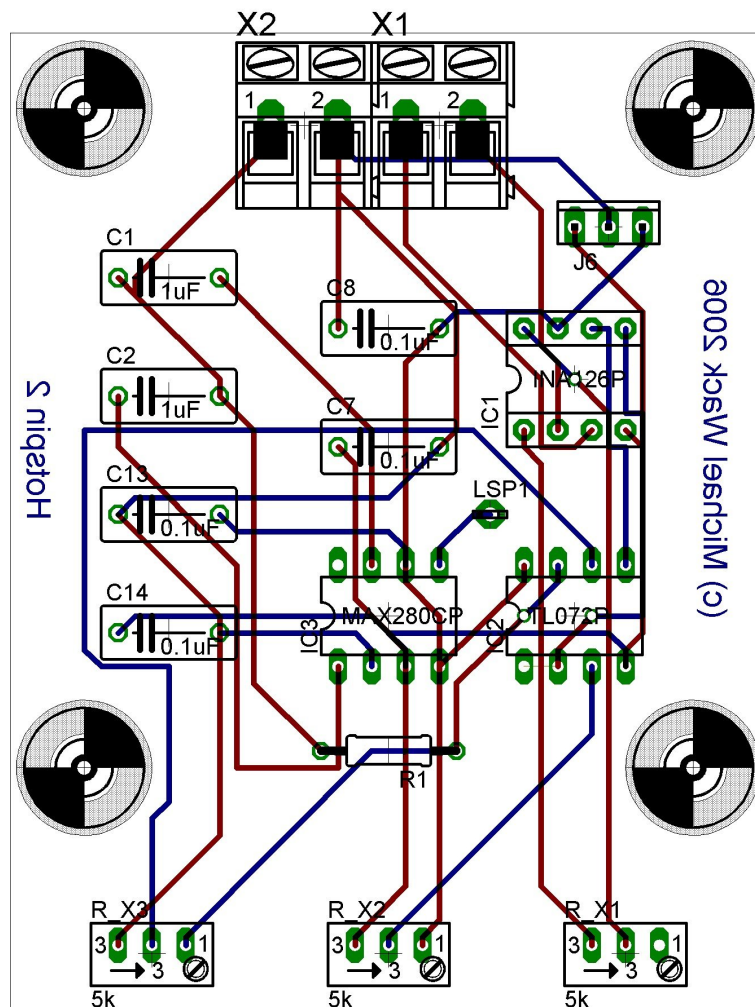


Abbildung E.2.: Leiterplattenlayout der Filter- und Verstärkerelektronik
 .Ausgelegt für eine doppelseitige Platine inkl. Bestückungsplan. Blau: Unterseite. Rot:
 Oberseite.

E.2. Hilfsspannungsversorgung

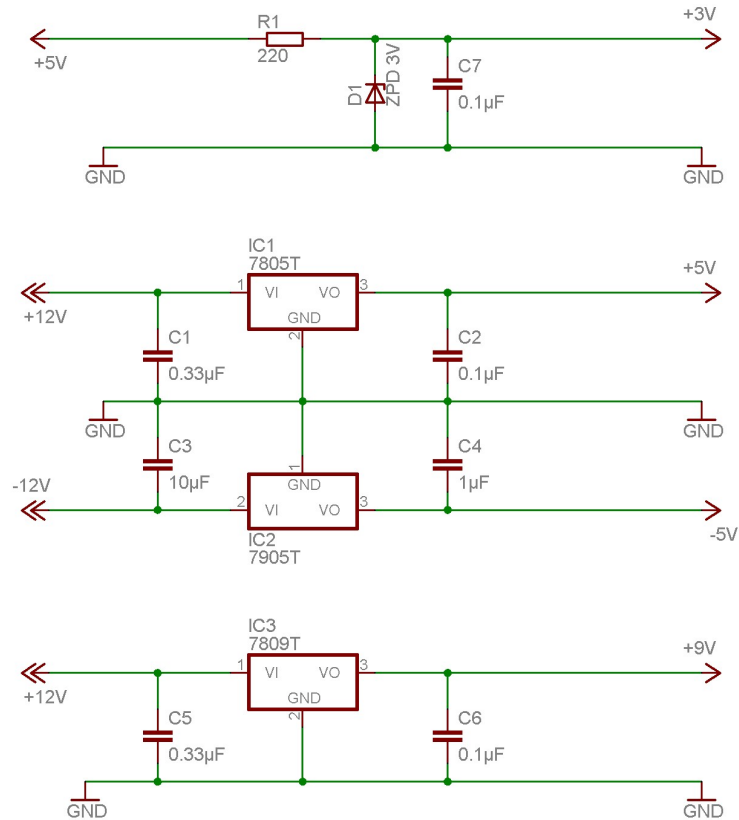


Abbildung E.3.: Schaltplan der Hilfsspannungsversorgung. Aus den ±12 V des Netzteils werden +3V, +5V, -5V und +9V generiert.

F. Verzeichnis der Datenblätter und Betriebsanleitungen

Die hier aufgeführten Dokumente finden sich auf der beiliegenden CD-ROM.

[INA126]	MicroPOWER INSTRUMENTATION AMPLIFIER Single and Dual Versions	INA126.pdf
[LTC1062]	5th Order Lowpass Filter	LTC1062.pdf
[MAX280]	5th Order, Zero DC Error, Lowpass Filter	MAX280.pdf
[TL072]	LOW-NOISE JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS	TL072.pdf
[HED261]	8 DIGIT COUNTER WITH HIGH/LOW SPEED COUNT INPUTS AND OPTIONAL BACKLIGHTING	HED261.pdf
[CERMET]	248 & 249 Conductive Plastic & Cermet Potentiometers	CERMET.pdf
[PC900]	Digital Output Type OPIC Photocoupler	PC900.pdf

F. Verzeichnis der Datenblätter und Betriebsanleitungen

Tabelle F.1.: Verzeichnis der verwendeten Datenblätter

[MAG03]	OPERATION MANUAL FOR Mag-03 RANGE OF THREE AXIS MAGNETIC FIELD SENSORS	MAG03.pdf
[2000CH]	Series 2000 Communications Handbook	2000CH.pdf
[2216e]	Temperaturregler Modell 2216e, Bedienungsanleitung	2216e.pdf
[C8051F35]	C8051F350/1/2/3, Handbook	C8051F35.pdf

Tabelle F.2.: Verzeichnis der verwendeten Betriebsanleitungen

G. Literaturverzeichnis

- [Bernstein und Blank 1993] BERNSTEIN, Herbert ; BLANK, Hans-Joachim: *PC-Labor*. Markt&Technik Buch- und Software-Verlag GmbH & Co., 1993. – 214–217,226–241 S.
- [Bleil und Petersen 1983] BLEIL, U. ; PETERSEN, N.: Variations in magnetization intensity and low-temperature titanomagnetic oxidation of ocean floor basalts. In: *Nature* 301 (1983), S. 384–388
- [Bronstein et al. 1999] BRONSTEIN, I.N. ; SEMENDJAJEW, K.A. ; MUSIOL, G. ; MÜHLIG, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. 4. Auflage. Verlag Harri Deutsch, 1999. – 774–776 S.
- [Buncick et al. 1983] BUNCICK, M. C. ; HUBBELL, H.H. ; BIRKHOFF, R. D. ; WARMACK, R.J. ; BECKER, R. S.: Computer-controlled method for removal of stray magnetic fields. In: *Rev. Sci. Instrum.* 54 (1983), S. 100–103
- [Collinson 1983] COLLINSON, D. W.: *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism*. Chapman and Hall, 1983. – 118–130,210–218,345–352 S.
- [Creer 1967] CREER, K. M.: Thermal demagnetization by the continuous method. In: COLLINSON, D.W. (Hrsg.) ; CREER, K.M. (Hrsg.) ; RUNCORN, S. K. (Hrsg.): *Methods in Palaeomagnetism*. Elsevier, Amsterdam, 1967, S. 287–295
- [Dembowski 1993] DEMBOWSKI, Klaus: *PC-gesteuerte Meßtechnik*. Markt&Technik Buch- und Software-Verlag GmbH & Co., 1993. – 220–222 S.

- [Fabian 2003] FABIAN, Karl: Some additional parameters to estimate domain state from isothermal magnetization measurements. In: *Earth and Planetary Science Letters* 213 (2003), S. 337–345
- [Fisher 1953] FISHER, R.: Dispersion on a sphere. In: *Proceedings of the Royal Society A* 217 (1953), S. 295–305
- [Fließbach 2000] FLIESSBACH, Torsten: *Elektrodynamik*. 3. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, 2000
- [Gee und Kent 1997] GEE, J. ; KENT, D.V.: Magnetization of axial lavas from the southern East Pacific Rise (14°-23°S): Geochemical controls on magnetic properties. In: *J. geophys. Res.* 102 (1997), S. 24873–24886
- [Gerstle 1990] GERSTLE, Ingrid: *Hochtemperatur-Spinner-Magnetometer: Aufbau und Erprobung*. Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Allg. und Angew. Geophysik, Diplomarbeit, Juni 1990
- [Haag et al. 1990] HAAG, M. ; HELLER, F. ; ALLENSPACH, R. ; ROCHE, K.: Self-reversal of natural remanent magnetization in andesitic pumice. In: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 65 (1990), S. 104–108
- [Horowitz und Hill 1989] HOROWITZ, Paul ; HILL, Winfield: *The Art Of Electronics*. Second Edition. Cambridge University Press, 1989. – 421–425 S.
- [Irving et al. 1961] IRVING, E. ; ROBERTSON, W. A. ; STOTT, P. M. ; TARLING, D. H. ; WARD, M.A.: Treatment of partially stable sedimentary rocks showing planar distribution of directions of magnetization. In: *Geophys. J.* 66 (1961), S. 1927–1934
- [Lang und Pucker 1998] LANG, Christian B. ; PUCKER, Norbert: *Mathematische Methoden in der Physik*. 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, 1998. – 567–573 S.
- [Matzka et al. 2003] MATZKA, Jürgen ; KRÁSA, David ; KUNZMANN, Thomas ; SCHULT, Axel ; PETERSEN, Nikolai: Magnetic state of 10-40 Ma old ocean basalts

- and its implications for natural remanent magnetization. In: *EPSL* 206 (2003), S. 541–553
- [Matzka 2001] MATZKA, Juergen: *Besondere magnetische Eigenschaften der Ozeanbasalte im Altersbereich 10 bis 40 Ma*. Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Allg. und Angew. Geophysik, Diss., Juli 2001
- [Pohl 1997] POHL, Jean: Einführung in die Magnetik. In: BEBLO, Martin (Hrsg.): *Umweltgeophysik*. Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1997, S. 26–30
- [Schmidt und Clark 1985] SCHMIDT, P. W. ; CLARK, D. A.: Step-wise and continuous thermal demagnetization and theories of thermoremanence. In: *Geophys. J. R. astr. Soc.* 83 (1985), S. 731–751
- [Schrüfer 2004] SCHRÜFER, Elmar: *Elektrische Messtechnik*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2004. – 168–175 S.
- [Soffel 1991] SOFFEL, Heinrich C.: *Paläomagnetismus und Archäomagnetismus*. 1. Auflage. Springer Verlag, 1991
- [Stephenson 1967] STEPHENSON, A.: Apparatus for thermal demagnetization by the progressive method. In: COLLINSON, D.W. (Hrsg.) ; CREER, K.M. (Hrsg.) ; RUNCORN, S. K. (Hrsg.): *Methods in Palaeomagnetism*. Elsevier, Amsterdam, 1967, S. 296–298
- [Thellier und Thellier 1959] THELLIER, E. ; THELLIER, O.: Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. In: *Ann. Geophys.* 15 (1959), S. 285–376
- [Tipler 1994] TIPLER, Paul A.: *Physik*. 3. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, 1994. – 518–520 S.
- [Udintsev 1989] UDINTSEV, G.B. (Hrsg.): *International Geological-Geophysical Atlas of the Atlantic Ocean*. IOC (of UNESCO), Min. Geol. USSR, Ac. Sci. USSR, Moscow, 1989-1990

- [Vine und Matthews 1963] VINE, F. J. ; MATTHEWS, D. H.: Magnetic anomalies over ocean ridges. In: *Nature* 199 (1963), S. 947–949
- [Wang et al. 2005] WANG, Daming ; VOO, Rob Van d. ; PEACOR, Donald R.: Why is the remanent magnetic intensity of Cretaceous MORB so much higher than that of mid to late Cenozoic MORB? In: *Geosphere* 1 (2005), S. 138–146
- [Wegener 1915] WEGENER, Alfred: *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. Vieweg Braunschweig, 1915
- [Zijderveld 1967] ZIJDERVELD, J.D.A.: A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. In: *Methods in Palaeomagnetism* (1967)

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

.....

Michael Wack

München, Juni 2006